Ing. EDOARDO BARNI

ELETTROTECNICA

CORSO TEORICO-PRATICO DI ELETTRICITÀ INDUSTRIALE

QUINTA EDIZIONE

CORRETTA, AMPLIATA E ILLUSTRATA
CON 407 NITIDE INCISIONI

ULRICO HOEPLI
EDITORE-LIBRAIO DELLA REAL CASA - MILANO
1929 A. VII

ELETTROTECNICA

PER LA COSTRUZIONE E LA RIPARAZIONE DELLE
MACCHINE ELETTRICHE NAZIONALI O STRANIERE

MANLIO MAZZOCCHI

AVVOLGIMENTI DELLE
MACCHINE ELETTRICHE
A CORRENTE CONTINUA ED ALTERNATA
COSTRUZIONE - RIPARAZIONE - ANORMALITÀ
LOCALIZZAZIONE DEI GUASTI

Terza edizione *interamente rifatta ed aumentata, di pagine 636, con 900 disegni originali di cui 67 a colori* . . . **L. 50,—**

Dello stesso autore ed a complemento della precedente opera:

Atlante di 162 schemi a colori
per avvolgimenti delle Macchine Elettriche a corrente continua ed alternata

SCHEMI PER AVVOLGIMENTI INDOTTI A CORRENTE CONTINUA
SCHEMI PER SISTEMI DI ECCITAZIONE CON POLI AUSILIARI
SCHEMI PER AVVOLGIMENTI DI STATORI PER ALTERNATORI
SCHEMI PER AVVOLGIMENTI DI STATORI PER MOTORI TRIFASI
SCHEMI PER AVVOLGIMENTI DI ROTORI PER MOTORI TRIFASI
SCHEMI PER AVVOLGIMENTI
DI TRASFORMATORI MONOFASI, BIFASI E TRIFASI

Volume-atlante in-8 gr., di pag. 12 di testo, con 96 tavole contenenti 162 schemi a colori . . . . . **L. 85,—**

In ogni caso pratico **di costruzione o riparazione di macchine di media potenza** questo libro-atlante porge la possibilità di risolvere immediatamente ogni dubbio e di procedere sicuramente nel lavoro, risparmiando fatica e delusioni, prove inutili, dubbi, tempo e danaro. Tutte le costruzioni correnti in Italia e all'Estero sono qui spiegate coi loro schemi. È il primo e l'unico che metta praticamente anche la più modesta officina in grado di assumere ed affrontare riparazioni, costruzioni e ricostruzioni di motori guasti o da trasformarsi.

ULRICO HOEPLI - EDITORE - MILANO

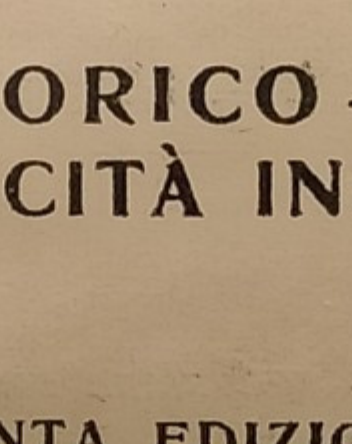
Ing. EDOARDO BARNI

ELETTROTECNICA

CORSO TEORICO-PRATICO DI ELETTRICITÀ INDUSTRIALE

QUINTA EDIZIONE

CORRETTA, AMPLIATA E ILLUSTRATA
CON OLTRE 400 INCISIONI

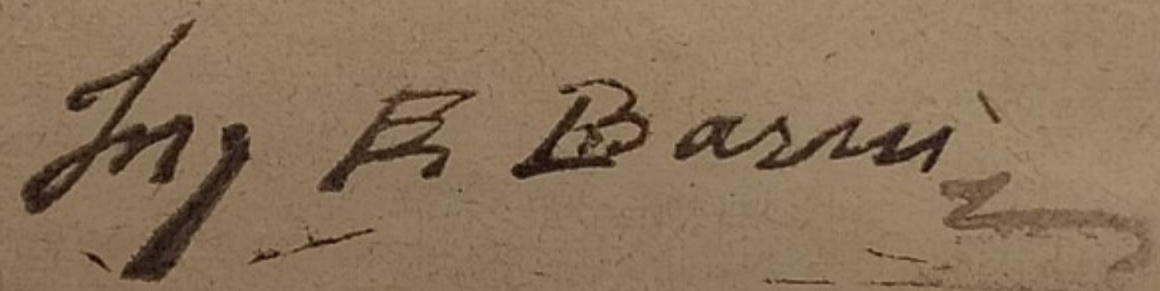


ULRICO HOEPLI
EDITORE LIBRAIO DELLA REAL CASA - MILANO
1929 - A. VII

PROPRIETÀ LETTERARIA

I diritti di riproduzione e di traduzione sono riservati per tutti i paesi, compresi la Svezia, la Norvegia e l'Olanda

Le copie non firmate dall' autore si ritengono contraffatte



TIPOGRAFIA "QUERINIANA" DELL'ISTITUTO ARTIGIANELLI - BRESCIA 1929

PREFAZIONE ALLA 5ª EDIZIONE

Scopo del libro è di esporre nel modo più semplice e conciso possibile i principii fondamentali di elettricità e loro applicazioni pratiche. Il progresso grandioso di questi ultimi tempi nelle applicazioni elettriche non si basa su nuove scoperte diremo così sensazionali o anche fondamentali, ma bensì sui perfezionamenti della costruzione delle grandi unità, delle grandi linee, dei colossali impianti. I principii di elettrologia sono rimasti immutabili sulle loro basi, mentre si sono moltiplicati in numero strabocchevole i particolari, gli adattamenti, gli apparecchi di manovra e sicurezza, gli automatismi, ecc.

Nello svolgimento delle materie ci siamo tenuti all'ordine stabilito dai programmi ministeriali per scuole professionali, e Istituti industriali per capi tecnici; dando un maggior sviluppo alla prima parte dedicata alle nozioni di elettrologia. La seconda parte, dedicata agli impianti di generazione della energia, alla sua trasmissione e distribuzione è più succinta poichè uno sviluppo completo non avrebbe trovato spazio adeguato in un sol volume.

Infine aderendo al desiderio di insegnanti abbiamo voluto completare il libro con un capitolo di cognizioni elementari sulle radiotrasmissioni anche perchè riescono più comprensibili per quelli che hanno già acquisite le basi dell'elettrotecnica contenute nella prima parte.

Il presente testo è rivolto specialmente a formare la coltura base pei tecnici elettricisti delle aziende industriali le cui mansioni non vanno più in là della sorveglianza degli

impianti, costruzione di modeste linee di trasmissione, calcolazione di apparecchi di riscaldamento, disegno e progetto di piccole installazioni, controllo dei misuratori della corrente, riparazione avvolgimenti.

Perchè l'insegnamento possa essere realmente utile agli allievi e studiosi, deve esssere integrato con dimostrazioni di laboratorio, esercitazioni per mezzo di strumenti con macchine elettriche, esercizi di disegno, di schemi e di impianti, ecc.

Solo con queste esercitazioni pratiche l'allievo può rendersi utile immediatamente entrando a far parte delle aziende industriali.

ABBREVIATIVI USATI

mm = millimetri
gr = grammi
cm = centimetri
dm = decimetri
m = metri
km = chilometri
kg = chilogrammi
mm^2 = millimetri quadrati
cm^2 = centimetri quadrati
dm^2 = decimetri quadrati
cmc = centimetri cubi
Kgm = chilogrammetri
mc = metri cubi
HP = cavalli
AS = Ampère-spire
f. e. m. = forza elettromotrice

V = volt
A = Ampère
W = watt
V.A = voltampère
kW = chilowatt
Wh = watt-ora
kWh = chilowatt-ora
Ah = ampère-ora
μF = microfarad
F = farad
Ω-O = ohm
c.c = corrente continua
c.a = corrente alternata
d d.p. = differenza di potenziale
a.i. = autoinduzione

SIMBOLI USATI NELLE FORMOLE

Lunghezza	l	Intensità di corrente	I, i
Sezione	s	Permeabilità	μ
Peso	p	Forza elettromotrice	E, e, V
Accelerazione di gravità	g	Resistenza	R
Angoli	α, β, γ	Resistività	ρ
Potenza	P	Quantità di corrente	Q
Energia o lavoro	W	Capacità	C
Cavalli vapore	H P	Costante dielettrica	ε
Rendimento	η	Coefficente di autoinduzione	L
Giri	n	Coefficente di mutua ind.	M
Velocità angolare	$2 \pi n$	Flusso magnetico	Φ
Temperature	T^o, t^o	Intensità del campo	H
Frequenza	f	Induzione nel ferro e traferro	B
Pulsazione	$\omega = 2 \pi f$	Reattanza	X
Tempo	t	Impedenza	Z
Spostamento di fase	φ		

NB. — I valori istantanei delle grandezze elettriche variabili col tempo si indicano con lettere minuscole. I valori efficaci con lettere maiuscole. I valori massimi coll' indice *m* al piede della maiuscola.

PARTE PRIMA

CAPITOLO I.

Elettricità statica.

1. - L'elettricità ed ipotesi sulla sua costituzione. — L'elettricità si rivela ai nostri sensi per mezzo di manifestazioni fisiologiche (scossa elettrica), meccaniche (attrazioni, ripulsioni, rotazioni di corpi), caloriche (riscaldamento di fili), luminose (scintille), chimiche (decomposizioni di corpi), magnetiche. Essa si genera in parecchi modi, per esempio collo sfregamento di aste di ebanite o di vetro con un panno; con delle macchine dette elettrostatiche, con le dinamo, con le pile, ecc.

ESPERIENZE: Si prenda un bastone di ebanite e lo si elettrizzi sfregandolo con un panno; se si avvicina il bastone a dei piccoli pezzi di carta o ad un pendolino elettrico si notano fenomeni di attrazione e ripulsione. Se si carica con una macchina elettrostatica una bottiglia di Leyda e si avvicina una mano si nota una scintilla e si sente una scossa.

Mettendo un sottil filo di ferro o di un metallo qualsiasi nel circuito di un accumulatore o di una dinamo si vede il filo diventare rosso, incandescente e poi fondersi.

Attaccando ai due fili derivati da una dinamo o batteria di pile, due carboni da lampada ad arco, toccando le punte e poi, allontanandole si forma una fiamma vivissima luminosa od arco voltaico.

Mettendo due pezzi metallici qualsiasi in un bicchiere d'acqua acidulata e facendo passare la corrente di un accumulatore, si vedono i metalli cambiar colore, ossidarsi, ed emanare bollicine di gaz.

Secondo le moderne ipotesi l'elettricità sarebbe formata da corpuscoli estremamente piccoli detti *elettroni* che si trovano diffusi in tutti i corpi e nello spazio. Gli atomi che in

chimica sono considerati come le più piccole e indivisibili unità della materia, non sono che degli agglomeramenti saldissimi di nuclei che diremo *positivi*, intorno ai quali si muovono gli elettroni di peso molto più piccolo. La massa di un elettrone sarebbe $\frac{1}{1835}$ di quella di un atomo di idrogeno (il quale pesa gr. $3{,}28 \cdot 10^{-24}$).

Gli elettroni si trovano nella materia parte allo stato libero, parte allo stato vincolato, cioè integranti della struttura dell'atomo.

Quando questi elettroni si trovano condensati allo stato libero, essi formano ciò che si dice una *carica elettrica negativa* o fluido negativo; questa condensazione di elettroni avviene a spese di una rarefazione degli elettroni vincolati ossia facenti parte degli agglomeramenti degli atomi e delle molecole le quali, privi di elettroni negativi, formerebbero una massa di residui positivi o *carica positiva*. Gli atomi e le molecole possono quindi essere *neutri* oppure *positivi*, ossia deficenti di elementi negativi, oppure anche aventi un numero sovrabbondante di elementi negativi.

La più importante caratteristica degli elettroni e dei residui positivi è un'azione di forza che si esercita fra le rispettive cariche elettriche; cioè succede che fra gli elettroni stessi oppure fra gli elementi positivi si forma una forza di repulsione, mentre fra gli elettroni e le cariche positive si esercita una attrazione.

Ma perchè possa esercitarsi una forza di attrazione o di ripulsione fra le cariche ammassate sui corpi materiali è necessario ammettere che il mezzo che li separa, od *etere*, partecipi all'azione, nel senso che esso resti modificato onde costituire il legame di forza fra gli elementi elettropositivi ed elettronegativi. Il meccanismo di questa modificazione od alterazione dell'etere rimane sconosciuto.

Una seconda caratteristica degli elementi costituenti la materia è il movimento; tutti gli elementi costituenti l'atomo (elettroni e nuclei positivi) e le molecole sono animati da movimenti di rotazione o di vibrazione.

La temperatura dei corpi costituisce l'indice di questi movimenti ossia la loro ampiezza. Ma mentre gli agglomeramenti costituenti gli atomi hanno movimenti oscillatori o rotativi in spazi limitatissimi, nell'ordine di alcuni milione-

simi di millimetro, gli elettroni liberi invece, data la loro estrema piccolezza si muovono in alcuni corpi detti conduttori, con enormi velocità negli spazi interatomici urtando negli atomi e urtandosi fra loro in un movimento disordinato. Ma se sorge in detti corpi una forza di attrazione o di spinta, gli sciami di elettroni sono sollecitati a muoversi in un'unica direzione formando un flusso o *corrente elettrica*. La forza che spinge gli elettroni a circolare si dice *forza elettromotrice;* essa può venire creata in parecchi modi, che vedremo, sia chimicamente che meccanicamente, che magneticamente.

La direzione della corrente elettronica essendo costituita da elementi negativi sarà verso i punti dei corpi carichi positivamente. I residui o corpuscoli positivi ove possono essere liberi di muoversi, come nei gaz, saranno sollecitati a muoversi in senso contrario. Però si ritiene che nei corpi solidi e cioè formati da atomi fissi i corpuscoli positivi non possono muoversi perchè formanti parte degli atomi stessi.

Le condensazioni di elettroni (cariche negative) si possono ottenere in diversi modi: per via meccanica confricando fra loro corpi diversi; per contatto fra corpi contenenti masse diverse di elettroni; per via chimica; od infine approfittando della azione di attrazione o di ripulsione per separare le cariche libere nei corpi e raccoglierle separatamente tale sistema si dice di elettrizzazione per influenza.

Lo studio dell'elettricità si suddivide generalmente in due parti: *elettricità statica* la quale esamina i fenomeni che riguardano le cariche elettriche isolate e ferme sui corpi; *elettricità dinamica* la quale invece studia il caso dell'elettricità in movimento sotto forma di un flusso di elettroni.

2. - Corpi conduttori e corpi coibenti od isolanti. — L'elettricità si comporta nei corpi in due modi: in alcuni, per esempio nei corpi metallici, le cariche elettriche comunicate in un punto qualsiasi di essi si diffondono con una grande velocità (300 mila chilometri al 1"); in altri invece le cariche elettriche non hanno facoltà di movimento apprezzabile. Le cariche rimangono condensate, isolate e appiccicate localmente; spariscono poi a poco a poco. I primi si dicono corpi conduttori; i secondi corpi coibenti od isolanti. E' però da osservarsi che *l'isolamento delle cariche sui coi-*

benti non è mai assoluto cioè una piccola parte delle cariche stesse riesce ad attraversare questi corpi; perciò a rigore di termini si dovrebbero dire i primi buoni conduttori; i secondi cattivi conduttori.

Appartengono ai corpi conduttori: tutti i metalli, le soluzioni saline, acide, il carbone amorfo, i corpi igroscopici, l'acqua impura anche leggermente. Appartengono ai corpi coibenti, il vetro, la porcellana, l'ambra, le resine, la ceralacca, la gomma elastica ed il caucciù, l'ebanite, lo zolfo, l'olio, la paraffina, l'aria ed i gaz secchi, la benzina, la seta, la lana, la cellulosa e la carta secca, la mica. (Vedi paragrafo 18).

Tra queste due serie di corpi vi è una graduazione infinita di corpi che non sono nè buoni conduttori, nè ottimi isolanti, per esempio il legno, le pietre, l'acqua pura ecc. Il corpo umano è un conduttore; il globo terracqueo è un enorme conduttore in cui ogni carica elettrica sparisce come goccia nel mare. Quando si vuol conservare le cariche elettriche nei conduttori bisogna contornarli e sostenerli con corpi isolanti i quali non permettono la fuoruscita. Da ciò l'origine degli *isolatori*.

3. - Fenomeni elettrostatici principali. — Le cariche elettriche libere sui corpi presentano diversi fenomeni:

1.° *Attrazione e ripulsione.* — La più semplice manifestazione che un corpo è elettrizzato è l'attrazione di piccoli corpi a cui succede spesso una ripulsione dopo il contatto.

ESPERIMENTO. (Fig. 1). — Sfregando un bastone di ebanite o di vetro con un panno o con una pelliccia o con un foglio di caucciù si osserva subito che esso attrae piccoli pezzi di carta. Si dice che il bastone è elettrizzato. Avvicinando il bastone elettrizzato ad un pendolino di sughero (semi conduttore) sospeso ad un filo di seta, si vede che prima viene attratto e dopo di essere venuto a contatto col bastone esso è vivamente respinto. Ma se il pendolino è respinto col bastone di ebanite esso viene viceversa attratto dal bastone di vetro.

Si può elettrizzare per strofinio con panno di lana anche un tubo metallico purchè isolato perfettamente.

Questi ed altri esperimenti provano che: 1° quando un corpo è elettrizzato da esso emana una forza a distanza; 2° che vi sono due specie di elettrizzazioni: positiva (o vitrea) e una negativa (o resinosa); 3.° che i corpi elettrizzati con cariche della stessa qualità si respingono mentre quelli carichi di elettricità contraria si attraggono.

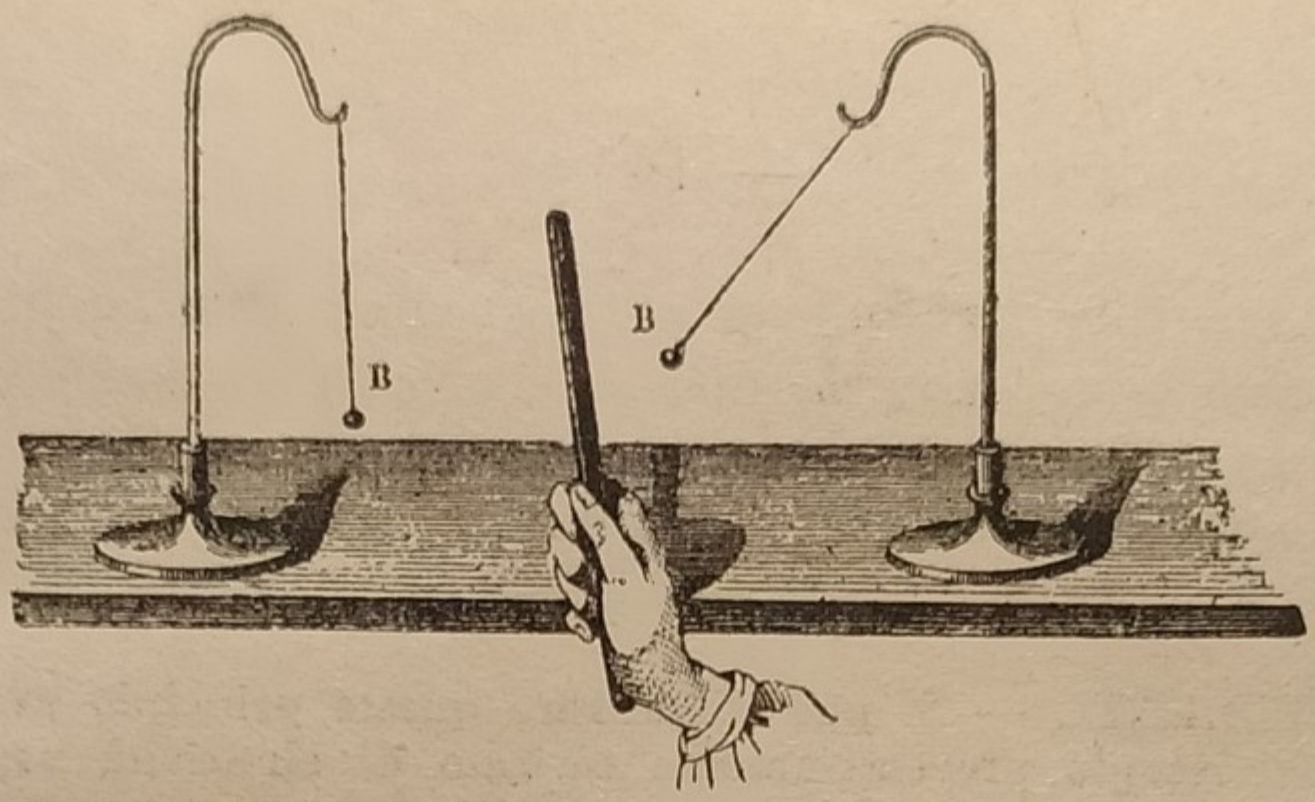


Fig. 1. - Attrazione e ripulsione.

Sulla ripulsione dei corpi carichi della stessa elettricità si fonda il principio di costruzione degli *elettroscopi* e cioè di apparecchi che servono a rivelare se un corpo possiede una carica elettrica ed a misurarla. Un elettroscopio ordinario è formato da una bottiglia di vetro in cui penetra un'asta di ottone portante due striscie di oro battuto o di alluminio sottilissime. (Fig. 2). L'asticciola attraversa il tappo della bot-

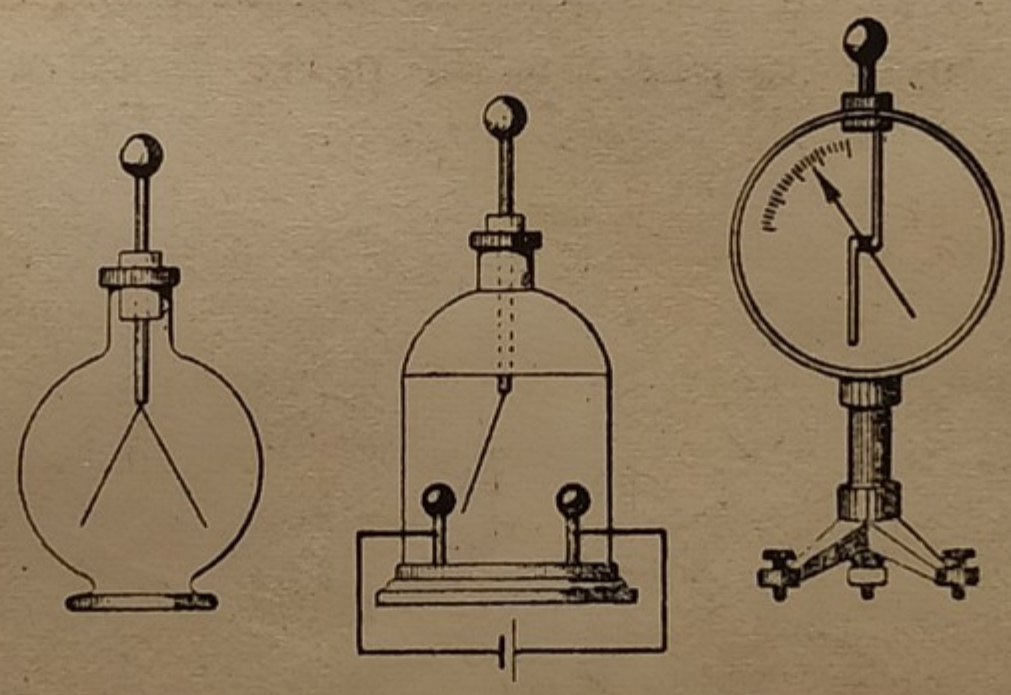


Fig. 2. - Tipi diversi di elettroscopi.
1. Elettroscopio semplice a foglie d'oro. - 2. Elettroscopio polarizzato.
3. Elettroscopio graduato a lamina d'alluminio.

tiglia e finisce in una sferetta. Allorchè si comunica alla sferetta una carica elettrica toccandola con un bastone elettrizzato o con una sorgente qualsiasi le due striscie d'oro caricandosi di elettricità dello stesso nome si respingono e dall'angolo di apertura si può dedurre la intensità della carica.

2.° *Doppia elettrizzazione.* — Quando si provoca una ca-

rica elettrica per strofinio si accorge che i due corpi: strofinante e strofinato, si caricano di elettricità contrarie e cioè si compie una elettrizzazione negativa (condensazione di elettroni) a spese di una elettrizzazione positiva (rarefazione di elettroni).

ESPERIMENTI. — Si può dimostrare questo principio avvicinando ad un elettroscopio preventivamente caricato di elettricità negativa un bastone di ebanite e il pezzo di lana o caucciù dopo un energico strofinìo.

Con altri esperimenti si può dimostrare che non solo le cariche dei corpi strofinati fra loro sono di nome opposto ma che anche le quantità di elettricità separate sono uguali. Si deduce che nei corpi neutri le cariche elettriche opposte sono libere e mescolate; separandosi una parte, di altrettanto resta scoperta la carica di segno contrario.

3.° *Elettrizzazione per influenza.* — Tutte le volte che si avvicina un corpo elettrizzato A ad un corpo conduttore isolato BC si verifica che quest'ultimo si elettrizza anch'esso con una carica di segno opposto sulla parte B risvolta al primo e di nome uguale sulla faccia opposta C. (Fig. 3).

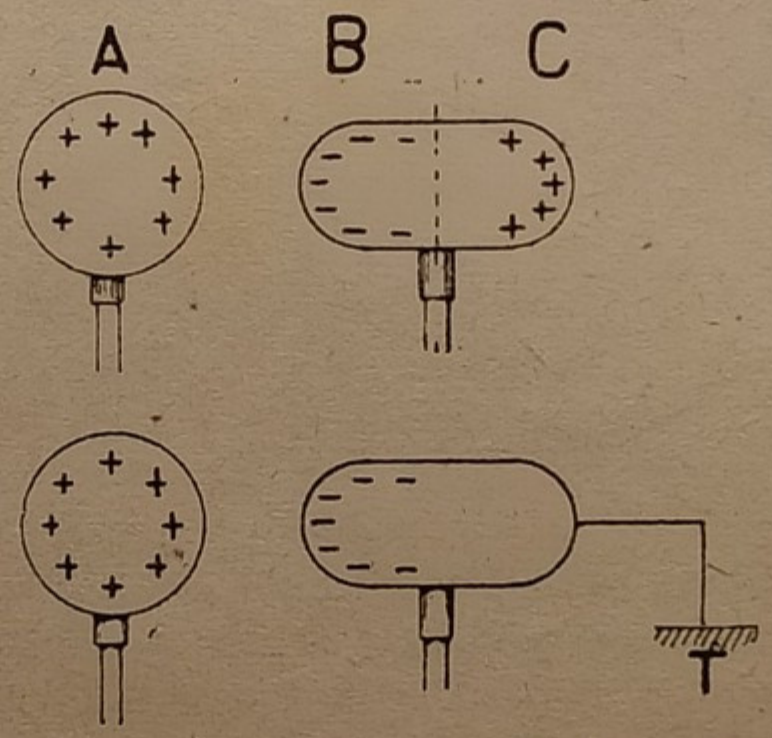


Fig. 3. - Elettrizzazione per influenza. - Collegando colla terra il corpo influenzato la carica residua è di nome contrario a quella del corpo influenzante.

Se i due corpi vengono allontanati, le due cariche sul corpo influenzato si ricompongono e il corpo BC ridiventa neutro. Se invece si riunisce la porzione C metallicamente colla terra allora la carica corrispondente sparisce e resta soltanto la carica B di segno opposto ad A.

Il fatto si spiega col principio fondamentale della attra-

zione e ripulsione delle cariche; succede cioè che un corpo elettrizzato attira a sè nei corpi circostanti le cariche libere di nome opposto e respinge lontano quelle di ugual segno. Ossia le cariche nei corpi neutri si separano.

ESPERIMENTI. — La dimostrazione più semplice consiste nell'avvicinare alla sferetta di un elettroscopio un bastone di ebanite o di vetro elettrizzato; le foglie dell'apparecchio divergono perchè le cariche nella sferetta e nelle foglioline metalliche si separano. Se allontaniamo il bastone le foglioline ricadono perchè le due cariche si ricompongono. Ma se l'elettroscopio era già carico e le foglie già aperte, avvicinando il bastone si osserva che le foglioline si aprono di più o si avvicinano a seconda della polarità della carica sul bastone.

Per caricare di elettricità positiva un elettroscopio si avvicina (Fig. 4) un bastone di ebanite elettrizzato per strofinìo; indi si tocca con un dito la sferetta dell'elettroscopio e si scarica a terra l'elettricità negativa sulle foglioline (Fig. 5). Le foglioline ricadono. Togliendo il dito ed il bastone di ebanite l'elettroscopio resta caricato di elettricità positiva (Fig. 6).

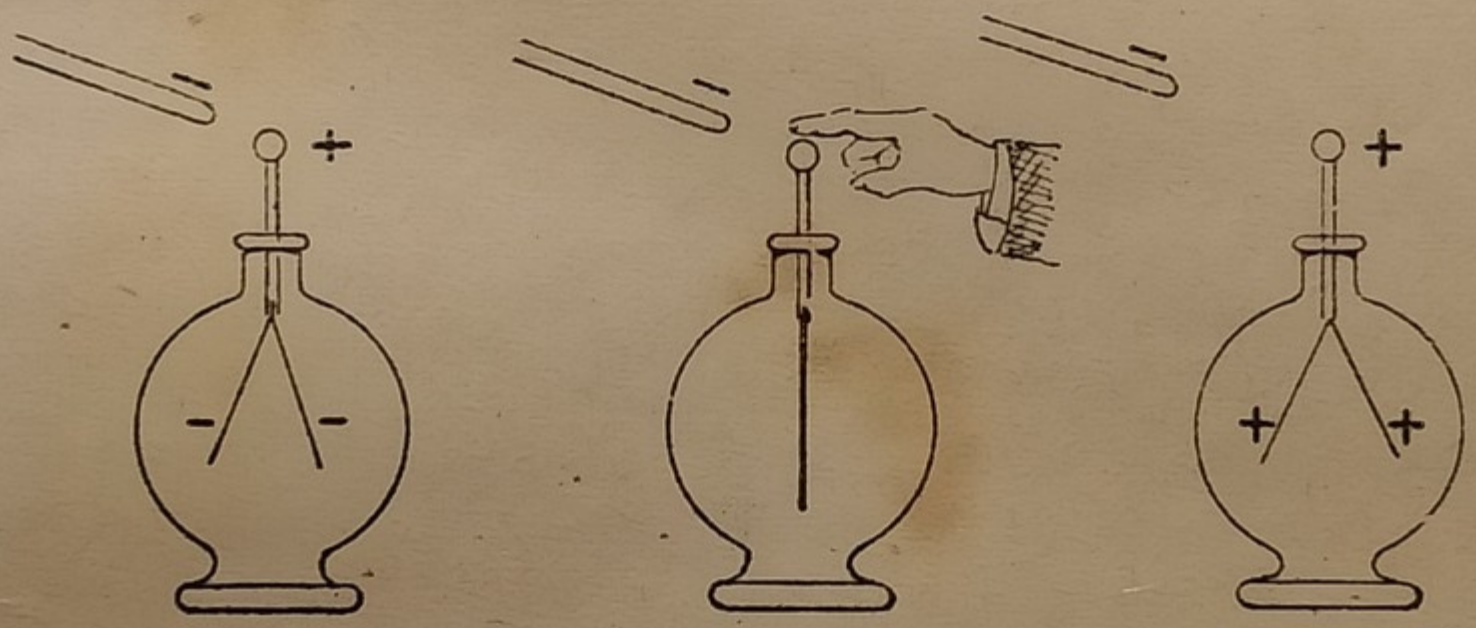


Fig. 4 - 5 . 6. - Le tre fasi per caricare un elettroscopio semplice.

Altri esperimenti si possono fare avvicinando un corpo cilindrico od ovale metallico munito di pendolini ad un altro elettrizzato. Si osserva che le coppie di pendolini divergono. Stacciando sul corpo influenzato della polvere finissima di zolfo e di minio (polveri che assumono cariche opposte) si osserva che metà diventa gialla di zolfo e metà rossa di minio.

I fenomeni ora accennati si dicono di *influenza* o meglio di *induzione elettrostatica*; il corpo carico di elettricità inizialmente si dice *influenzante* od *induttore* mentre l'altro si dice *influenzato* od *indotto*.

Il fenomeno dell'induzione elettrostatica spiega il perchè i corpi elettrizzati attirano i corpi leggeri come nel caso del pendolino nella prima esperienza elettrostatica. Accade cioè che il corpo elettrizzato provoca sulle parti più vicine dei

corpi conduttori o semiconduttori circostanti delle cariche di nome opposto. Queste essendo più vicine delle altre di nome uguale, vengono attirate.

4.° *Le cariche elettriche ferme nei conduttori sono esterne e superficiali.* — Il fenomeno della superficialità delle cariche nei corpi conduttori si spiega facilmente supponendo suddivisa in tanti piccoli elementi, la superficie esterna del corpo elettrizzato. Ciascun elemento di superficie essendo carico della stessa elettricità tenta di respingere quella degli altri elementi. Il risultato è che in un corpo a superficie limitata isolato, le cariche sono spinte in fuori verso la superficie mentre nel cavo interno il corpo perde ogni segno di elettricità.

ESPERIMENTI. — Se si comunica una carica comunque forte ad una gabbia di filo metallico isolata in forma di cilindro o di campana si verifica che le coppie di pendolini attaccati all'esterno divergono mentre quelle attaccate all'interno stanno ferme. (Fig. 7).

Se si copre un corpo metallico carico di elettricità con una reticella metallica e si strappa servendosi di un filo isolante la reticella, si osserva che sul corpo metallico non è rimasta nessuna carica e che la elettricità è passata alla reticella.

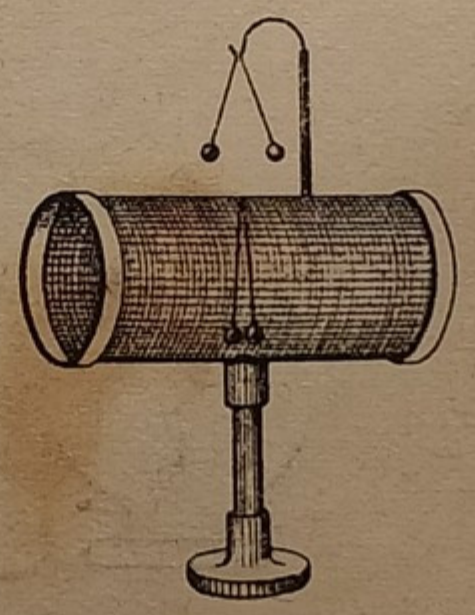


Fig. 7.

Mettendo un elettroscopio all'interno della gabbia elettrizzata ed in comunicazione metallica con la rete, esso non dà segni di carica.

Interessanti esperimenti si possono fare col pozzo di Beccaria.

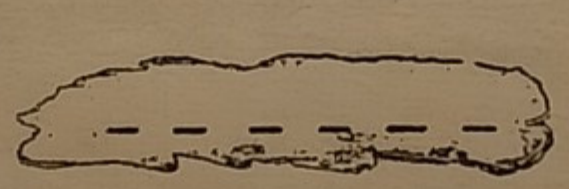
5.° *Dissimetria nella densità delle cariche.* — Un'altra conseguenza della repulsione reciproca fra le cariche elementari in cui si può immaginare suddivisa la carica totale sopra un corpo conduttore è: che a seconda della forma della superficie del corpo la carica tenderà a distribuirsi disugual-

mente. Infatti *si verifica che l'elettricità tende ad addensarsi nelle parti della superficie dove il raggio di curvatura è più piccolo in confronto di quelle parti dove la superficie è piana o meno curva.* La causa deriva dal fatto che le parti prominenti di minor curvatura sono sede di un maggior numero di forze repulsive da parte degli altri elementi più piani della superficie. Invece sopra una sfera si avrà una uniforme ripartizione.

6.° *Potere dispersivo delle punte.* — Quando la curvatura della superficie di un conduttore diventa estremamente piccola da assumere la forma di una punta la condensazione della carica diventa assai forte sotto l'impulso della forza ripulsiva degli altri elementi (tensione elettrica). In queste condizioni le molecole dell'aria ambiente a contatto colle punte vengono elettrizzate e poi respinte violentemente in modo da creare un soffio sottile d'aria come quello di un cannello; le cariche così si disperdono.

ESPERIMENTI. — Applicando una punta sottile ad un elettroscopio caricato esso si scarica subito; se la punta viene applicata ad un conduttore in comunicazione con una macchina elettrica si avverte il soffio d'aria avvicinando una mano od una candela. Nell'oscurità sulla punta si osserva un fiocchetto violaceo (polo +) o una stelletta (polo —).

Da questi esperimenti si conclude che le punte e gli spigoli acuti scaricano l'elettricità attraverso agli isolanti che lo circondano. Su questo fenomeno si fonda l'applicazione dei parafulmini per la protezione degli edifici.



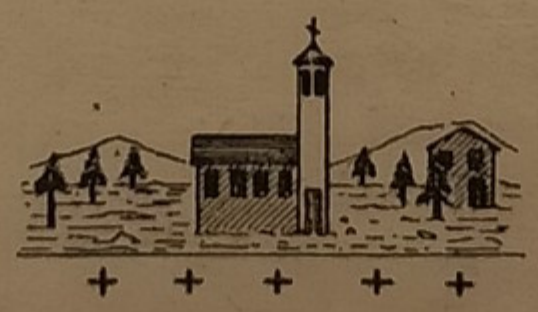


Fig. 8. - Distribuzione delle cariche durante un temporale.

Una nube temporalesca rappresenta notoriamente un corpo semiconduttore caricato di elettricità negativa ed isolato nell'aria. Per un effetto di induzione elettrostatica, la superficie del suolo affacciata alla nube si carica di elettricità positiva. (Fig. 8).

Se il suolo è munito di punte naturali od artificiali (parafulmini) queste aiuteranno la diffusione dell'elettricità contraria alla nube e quindi la neutralizzazione delle cariche atmosferiche diminuendo il pericolo dei fulmini.

Dai fenomeni enunciati si deducono i seguenti concetti pratici per l'impianto dei parafulmini: 1.° fare i parafulmini con molte punte per aumentare la dispersione; 2.° stendere lungo gli spigoli delle case da proteggere dei conduttori e collegare ad essi tutte le masse metalliche: grondaie, travature e coperture metalliche in modo da costituire sopra l'edificio

Fig. 9. - Protezione dei fabbricati contro il fulmine.

da proteggere come una gabbia a grandi maglie con punte verso l'esterno. 3.° Mettere a terra la stessa gabbia in diversi punti. 4.° impiegare conduttori a larga superficie (ferri piatti, corde metalliche, tubi). (Fig. 9).

Un'altra deduzione pratica per i costruttori di macchine elettriche ad alta tensione è che si deve evitare l'uso di conduttori a spigoli acuti, poichè in caso di cariche elettrostatiche provenienti dai fili esterni, gli spigoli sono sede di pressioni elettrostatiche le quali sottopongono gli isolanti a sforzi assai più grandi in confronto di quelli che si avrebbero con conduttori grossi e a superficie liscia.

7.° *Scariche elettriche.* — L'elettricità sui conduttori si sperde in breve tempo per *diffusione* a mezzo delle molecole

di aria che si elettrizzano per contatto e vengono poi respinte. Questa diffusione è più o meno rapida a seconda dello stato igrometrico dell'aria. Si disperde anche per *conduzione* lungo la superficie degli isolanti specie se coperti da un velo di umidità ed infine, come si è detto, a mezzo di punte.

Quando poi i conduttori di opposta carica vengono avvicinati oltre ad un certo limite, l'aria o il coibente interposto viene lacerato e trapassato da una scarica violenta accompagnata da una vivace scintilla, capace di riscaldare e fondere gli isolanti e di accendere miscele di gaz esplodenti, ecc. Questa scarica si dice *disruptiva* ed è accompagnata dal rumore di un colpo secco.

Nei tubi di vetro contenenti gaz rarefatti la scarica assume la forma di un flusso luminoso continuo di diverso colore a seconda dei gaz. A un certo grado di rarefazione il flusso luminoso diventa stratificato a striscie luminose ed oscure. Il flusso luminoso accende sopra certi sali fosforescenti delle colorazioni vivissime. Le scariche nei gaz formano un capitolo interessante dell'elettricità, ma che però non hanno applicazioni importanti nella tecnica industriale.

E' importante notare che la scarica fra due corpi conduttori carichi di elettricità opposta, provocata con un terzo conduttore messo fra i due avviene in un tempo estremamente breve, e la neutralizzazione delle cariche è totale sui corpi conduttori interessati. Invece la scarica dei corpi coibenti elettrizzati (vetro, ebanite, ecc.) non avviene che localmente nei punti di contatto perchè le cariche non possono muoversi; la scarica di questi corpi avviene in piccolissima parte per conduzione ed in gran parte per diffusione all'aria circostante.

8.° *Scariche residue e comportamento dei coibenti.* — Interessanti esperienze si possono fare con le *bottiglie di Leyda*. Una bottiglia di Leyda è formata da un vaso o recipiente di vetro con due superfici metalliche: una aderente al vetro interno, una all'esterno e formate o da stagnola o da lamine di ottone. (Fig. 10).

Le superfici metalliche si dicono le *armature*. Una bottiglia di Leyda ha la proprietà di assorbire e ritenere notevoli cariche di nome contrario sulle due armature quando siano messe in comunicazione con una macchina elettrostatica. Se dopo aver scaricato con un conduttore posto ad arco fra le

due armature le cariche di nome opposto, si provoca un'altra scarica dopo qualche minuto si osserva che le armature si sono automaticamente ricaricate e si ottiene un'altra scintilla. L'esperimento delle *scariche residue* si può ripetere diverse volte.

Ciò dimostra che le scariche residue provengono dalla induzione del vetro rimasto elettrizzato sulle armature metalliche, anche dopo la prima scarica. Ossia sul vetro rimangono, per un certo tempo, localizzate delle cariche; queste cariche sono di nome opposto: una alla superficie interna, l'altra alla esterna.

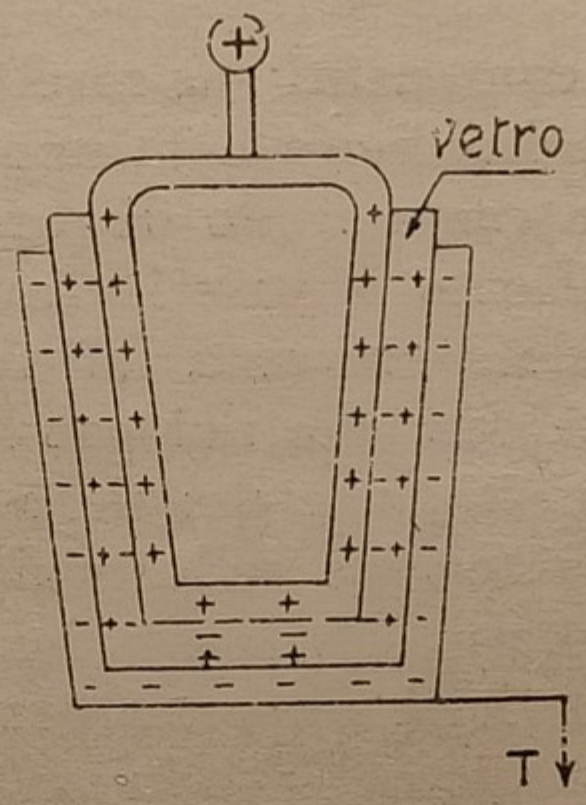


Fig. 10 - Come si distribuiscono le cariche superficiali in una bottiglia di Leyda.

Queste cariche superficiali sul vetro inducono ogni volta sulle armature metalliche delle cariche per influenza e spariscono lentamente perchè l'elettricità sui coibenti non ha facoltà di movimento.

Tale ipotesi si può controllare anche con una bottiglia di Leyda scomponibile. (Fig. 11). Infatti si può caricare questa bottiglia e poi scomporla scaricando a terra o fra loro le armature; ricomponendo la bottiglia le armature si rivelano subito elettrizzate e possono dare ancora forti scintille.

Da questi esperimenti si deduce che nei coibenti le cariche elettriche ossia le concentrazioni di elettroni (cariche —) e di residui positivi (cariche +), provocate per induzione o strofinio avvengono localmente nelle singole molecole o negli

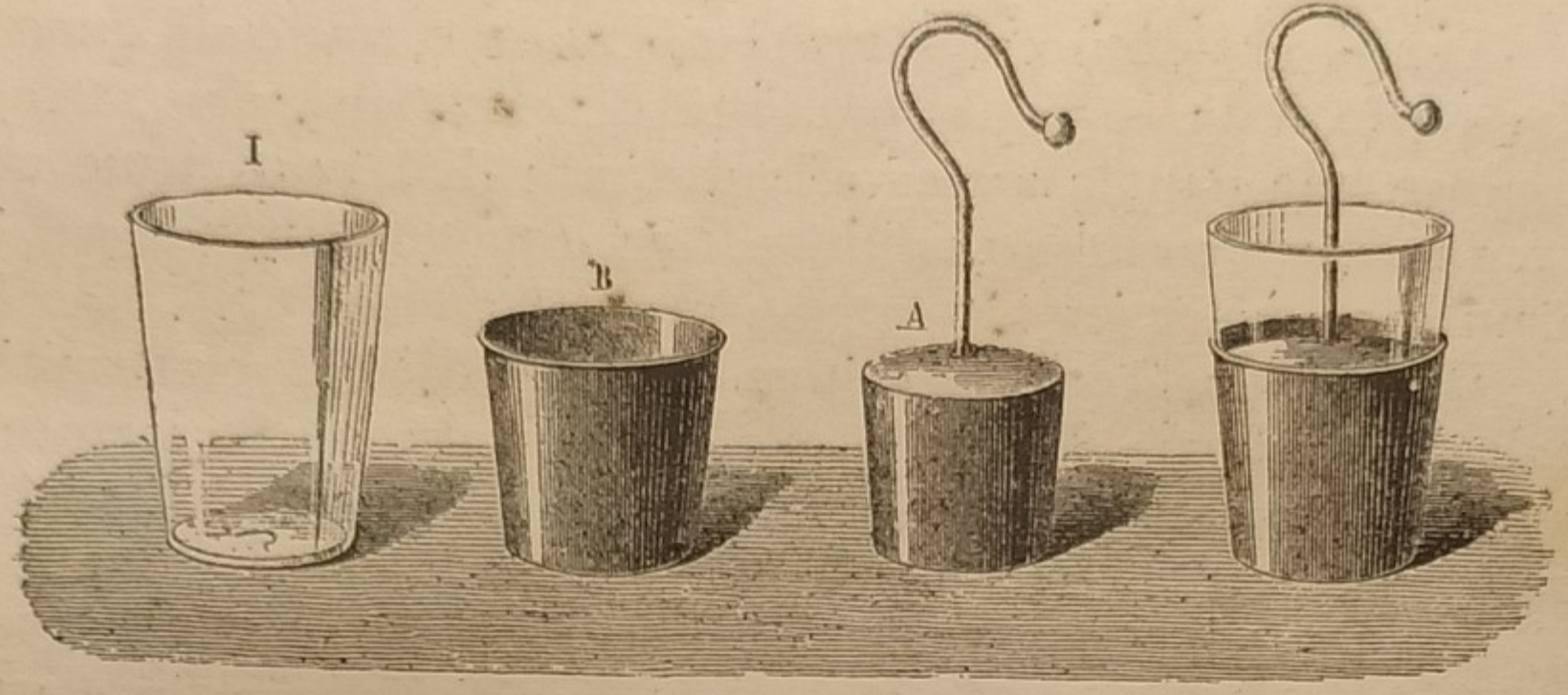


Fig. 11 - Bottiglia di Leyda scomponibile.

atomi. Lo spostamento di queste cariche provoca una *deformazione* nella struttura atomica, uno stato forzato nella posizione degli elettroni negli atomi ed al quale stato si oppongono le forze elastiche; le cariche opposte si spostano solo in spazi estremamente piccoli, il che si dice *polarizzazione*. Nei conduttori invece le cariche, formate da sciami di elettroni, hanno libertà di movimento tra gli spazi intermolecolari.

4. - Legge di Coulomb. Unità di carica. — Il Coulomb fu uno dei primi fisici che richiamarono l'attenzione sui fenomeni elettrici verso il 1785. — Sperimentando con uno strumento da lui costruito detto bilancia elettrica stabilì questa legge: *La forza di attrazione o di ripulsione fra due cariche elettriche* Q_1 e Q_2 *è proporzionale alle rispettive quantità di elettricità e inversamente proporzionale al quadrato delle distanze.* La legge si esprime colla formola:

$$P = \frac{Q_1 \ Q_2}{d^2} K$$

dove K è un coefficiente di proporzionalità.

Si convenne poi dai fisici di esprimere le quantità di elettricità Q con una unità di misura per cui esprimendo P in dine (1) e *d* in centimetri si potesse far senza del coefficiente K onde ne risulta la formula semplificata:

$$P = \frac{Q_1 \ Q_2}{d^2} \text{ dine}$$

---

(1) Si dice *dina* l'unità di forza che imprime alla massa di 1 grammo l'accelerazione di un centimetro al 1" — corrisponde a $\frac{1}{981}$ di grammo.

Perciò si definì come *unità di massa* o *unità di quantità di elettricità* la carica o quantità di elettricità che attrae o respinge una uguale carica alla distanza di 1 centimetro colla forza unitaria ossia di una *dina*. Una dina corrisponde a 1/981 di un grammo.

Questa *unità elettrostatica* di quantità di elettricità è molto più piccola di quella che, come vedremo in seguito, si impiega di solito nella elettrodinamica e che si chiama *Coulomb* avendo origine diversa.

Un Coulomb equivale a 3.10^9 unità elettrostatiche (ossia un Coulomb è 3000 milioni di volte l'unità definita in elettrostatica secondo la legge di Coulomb).

ESEMPIO. — Due cariche di un coulomb ciascuna — ossia $3\cdot10^9$ unità e. s. — concentrate alla distanza di un metro (ossia 10^2 cm.) si attraggono con una forza:

$$P = \frac{3\cdot10^9 \times 3\cdot10^9}{10^2 \times 10^2} = 3^2 \cdot 10^{14} \text{ dine}$$

Siccome 1 chilogrammo equivale a circa un milione di dine ossia 10^6 dine la forza P sarebbe di 9.10^8 chilogrammi.

5. - Campo elettrico. — Si dice *campo elettrico* lo spazio che circonda un conduttore isolato carico di elettricità. Un

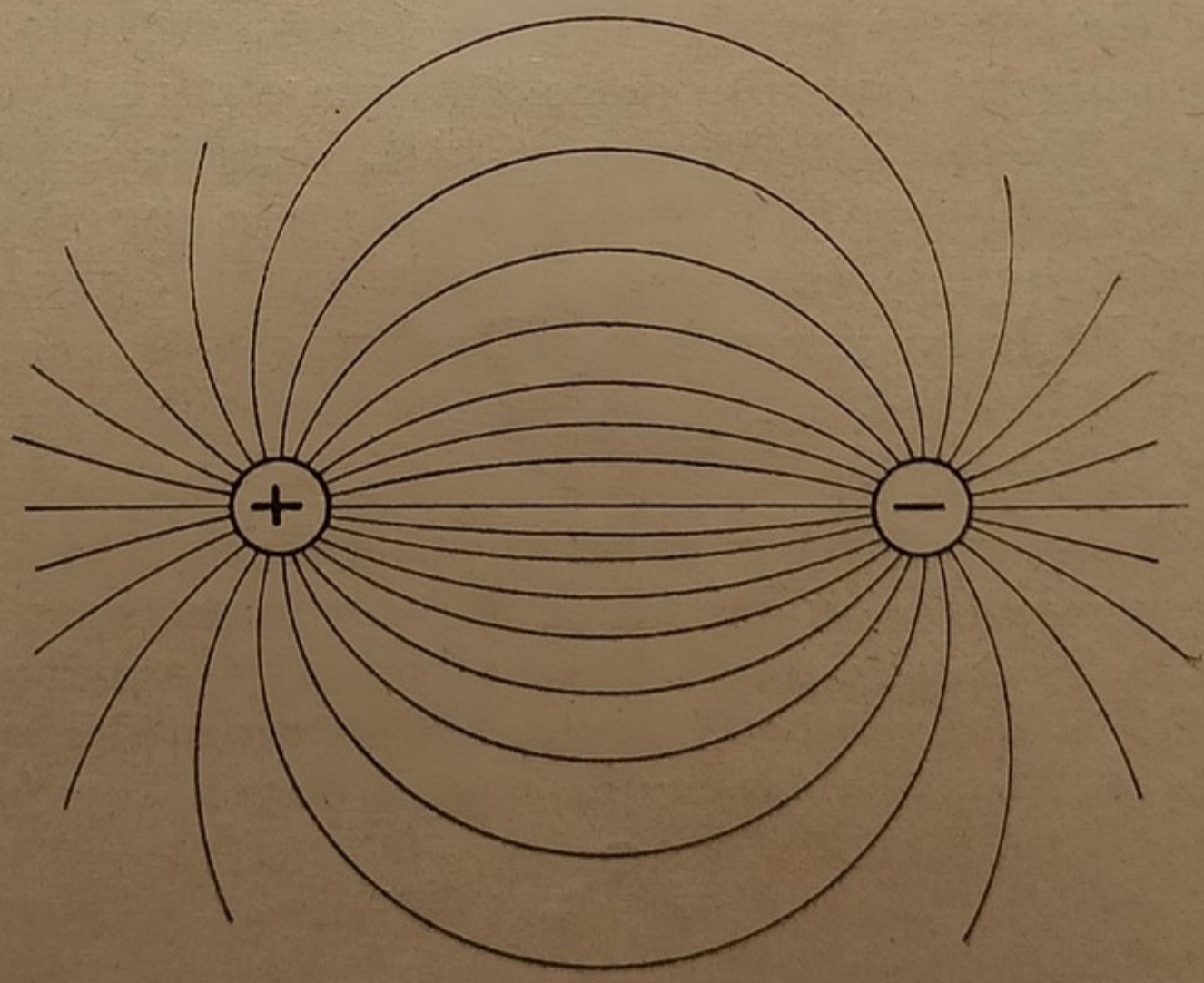


Fig. 12. - Campo elettrico fra due sfere o fra due corpi cilindrici elettrizzati.

corpo elettrizzato o una carica elettrica che si trova nell'ambiente di un campo elettrico è sollecitato a muoversi da forze di attrazione o ripulsione che emanano dal conduttore carico di elettricità.

Per aiutare la mente a concepire e, diremo così, materializzare un campo elettrico si è pensato di raffigurarlo con tante linee elastiche dette *linee di forza* le quali staccandosi perpendicolarmente dalla superficie di un corpo elettrizzato si irradiano nello spazio (Fig. 12) respingendosi fra loro. Ogni linea sta a rappresentare la traiettoria che seguirebbe un punto elettrizzato per muoversi nel campo, ovvero sia in ogni punto dello spazio la tangente alla linea di forza passante per esso segna la direzione della forza agente in quel punto. L'insieme delle linee di forza costituisce un *flusso di forza.*

Il numero H delle linee di forza passante in un centimetro quadrato di sezione traversale al flusso si dice *unità* o *intensità* del campo ed è espresso numericamente dalla forza in dine che si eserciterebbe su quel centimetro quadrato se in esso vi fosse un'unità di quantità di elettricità.

Quindi se H è la densità del campo (linee per cmq.) e Q la quantità di elettricità in un punto espressa in unità elettrostatiche, la forza in dine F è espressa da:

$$F = H\ Q$$

Un campo si dice uniforme quando è formato da tante linee di forza parallele ed equidistanti. Il campo di una sfera è formato da tanti raggi diretti verso il centro. Il campo fra due superfici parallele vicine è uniforme.

Se immaginiamo un punto carico dell'unità di quantità di elettricità e una sfera del raggio di un centimetro intorno al punto, allora per ciascun centimetro quadrato di superficie della sfera una carica *unitaria* eserciterà sul centro la forza di 1 dina. Quindi dal punto elettrizzato colla quantità uno di elettricità si dirama un flusso di 4π linee di forza, essendo 4π la superficie della sfera di raggio 1 cm.

In generale si può dire: (teorema di Gauss) che da ogni punto carico di una massa m emana un flusso Φ di linee di forza espresso:

$$\Phi = 4\pi m$$

Chiamando *d* la densità di carica alla superficie di un conduttore (*carica per cmq*) l'intensità del campo alla superficie sarà espressa:

$$\Phi = 4 \pi \, d$$

6. - Potenziale. — Da quanto si è venuto esponendo si deduce: che nell'ambito di un campo elettrico *ogni carica elettrica rappresenta una riserva di energia potenziale.* Infatti se abbandoniamo a sè la carica essa verrà attratta o respinta insieme al corpo che la porta e nello stesso tempo fornirà energia meccanica o calorifica. Viceversa se trasportiamo una carica in opposizione alla forza che la sollecita nel campo dovremo spendere del lavoro; questo lavoro andrà ad accumularsi nel corpo portante la carica. Il lavoro reso o consumato in questi movimenti sarà rappresentato dalla forza media per lo spazio percorso nella direzione della forza.

Tutte le azioni di ripulsione o di attrazione di corpi elettrizzati dimostrano una capacità di lavoro in quanto esercitano una forza per uno spazio. Ma il più convincente esperimento consiste nello scaricare le armature di una bottiglia di Leyda attraverso a fili sottili, il che significa trasportare la carica negativa sulla positiva. Si osserva che detti fili si scaldano e talvolta si arroventano e si fondono. Da ciò un metodo di misura del lavoro elettrico corrispondente al campo alla superficie del vetro della bottiglia.

L'attitudine delle cariche elettriche a creare del lavoro si dice potenziale. Per esprimere in cifre il potenziale esso viene così definito:

Si dice potenziale elettrostatico di un punto A di un campo elettrico o di un conduttore A il lavoro in erg (1) *che eserciterebbe l'unità di quantità di elettricità passando dal punto A alla terra ritenuta di potenziale zero.*

Se invece di passare alla terra facciamo muovere la carica dal punto A a potenziale V_1 ad un punto B di potenziale V_2 minore il lavoro compiuto sarà:

$$V_1 - V_2 = \textit{forza media} \times \textit{distanza } AB$$

essendo la forza espressa in dine e la distanza in cm.

---

(1) Si dice *erg* il lavoro esercitato dalla forza di una dina per lo spazio di un centimetro.

La differenza V_1 - V_2 si dice *differenza di potenziale o tensione.*

Se la distanza A B è di 1 centimetro nella direzione della forza allora V_1 - V_2 esprime la *forza media esercitata* trasportando la carica uno del tratto di un centimetro da A e si dice allora *gradiente* del potenziale o del campo nel punto A. — Esso esprime, per definizione, l'intensità H del campo.

Il gradiente ha una grande importanza pratica perchè rappresenta il grado di sollecitazione a cui sono sottoposti gli isolanti in un campo elettrico. Se il gradiente sorpassa determinati limiti gli isolanti non resistono più e vengono trapassati dalla scarica elettrica.

Esempio: Per l'aria e per la superficie degli isolatori di porcellana il gradiente massimo oltre il quale comincia la scarica è intorno a 20 mila volt per centimetro. (Elettro dinamici, vedi più avanti).

L'unità di misura del potenziale elettrostatico è dato anche dalla differenza di potenziale fra due cariche unitarie di elettricità quando portando l'una sull'altra si ricava il valore di 1 erg.

Tutti i punti di un campo elettrico che hanno lo stesso potenziale si dicono *equipotenziali* e formano una superficie di livello sulla quale le cariche spostandosi non esercitano nessun lavoro. Le superfici equipotenziali tagliano le linee di forza perpendicolarmente.

Ogni superficie equipotenziale ha un uguale gradiente.

La superficie dei conduttori è pertanto equipotenziale. Mettendo in comunicazione metallica, cioè conduttrice, due corpi conduttori aventi una differenza di potenziale fra loro, immediatamente la carica che ha il potenziale più alto (positivo) si trasmette a quel conduttore che ha il suo potenziale più basso ed il lavoro reso si rivela sotto forma di calore nella comunicazione metallica. Il lavoro reso sarà espresso dalla differenza di potenziale fra i due conduttori moltiplicato per la quantità di elettricità.

L'angolo con cui le due foglioline di un elettroscopio divaricano dà l'idea del potenziale esistente nell'asta dell'apparecchio o del corpo con cui si trova collegato. Siccome facendo comunicare un conduttore elettrizzato colla terra l'elettrosco-

pio segna zero e sparisce ogni sègno di carica si è convenuto di ritenere il potenziale della terra zero.

Dato un certo conduttore isolato, la quantità di elettricità che esso può ritenere è proporzionale al potenziale che esso ha rispetto alla terra (potenziale zero); la carica cioè per un dato conduttore non si può aumentare o diminuire se non aumentando o diminuendo il potenziale. La terra è un conduttore tanto grande che le cariche che si possono produrre coi nostri mezzi non producono un aumento apprezzabile del potenziale. Ecco perchè l'elettroscopio *messo a terra* segna zero.

I potenziali dei corpi conduttori isolati, rappresentano la differenza di potenziale che essi hanno colla terra.

7. - Condensatori. — Si dice *condensatore* un sistema di due superfici metalliche separate da un isolante. Supponiamo di avere due dischi metallici, paralleli ed affacciati l'uno all'altro, isolati, l'uno in comunicazione con una macchina elettrica e l'altro colla terra. (Fig. 13).

I due dischi si chiamano anche *armature* del condensatore.

Se il disco A ha ricevuto una carica +, sul disco B per

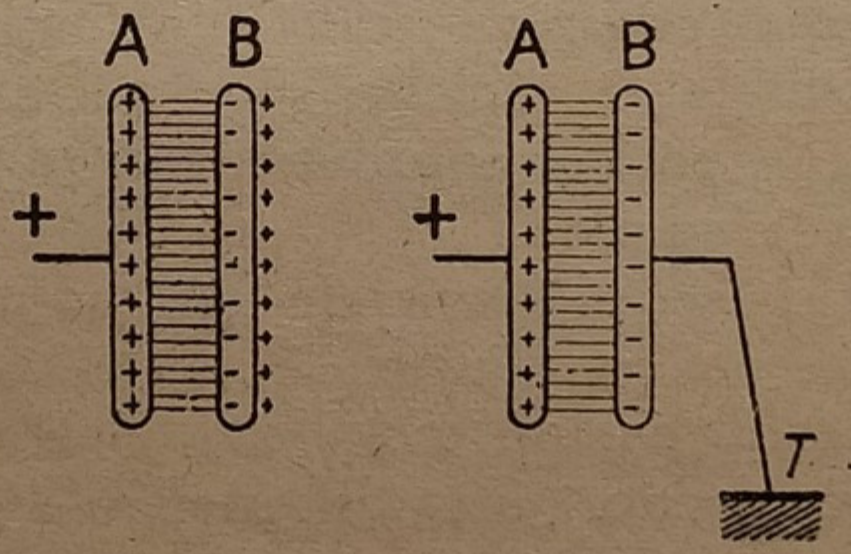


Fig. 13. - Condensatore a due piani paralleli.

induzione si formerà un'uguale carica di segno —, la quale a sua volta richiamerà, per l'azione reciproca attrattiva fra le cariche di nome opposto, una maggior carica sul disco A.

Tutte le volte che si aumenta la carica su A si aumenta proporzionalmente la forza attrattiva su B e perciò anche il lavoro rappresentato, per definizione, dalla carica per la differenza di potenziale fra le due armature. Quindi chiamando

V la differenza di potenziale, Q la carica e C un coefficiente di proporzionalità avremo:

$$Q = CV \text{ ossia } C = \frac{Q}{V}$$

Il coefficiente C si chiama *Capacità del condensatore.*

Se avviciniamo tra loro i due dischi A e B carichi di opposta polarità la differenza di potenziale V dovrà diventare più piccola poichè coll'avvicinamento abbiamo sottratto una parte di energia.

Ma se la carica è rimasta costante essendo diminuito V, sarà diventato più grande il rapporto $\frac{Q}{V}$ ossia la capacità del sistema.

Quindi *la capacità* o *potere condensante aumenta avvicinando le armature, ossia*: a parità di differenza di potenziale avvicinando le armature si aumenta la quantità di elettricità condensata. In ogni caso la *capacità* di un sistema condensatore dipende unicamente dalle dimensioni geometriche e dal dielettrico interposto.

Fig. 14. - Elettroscopio con condensatore.

ESPERIMENTI. — Se sopra l'asta di un galvanoscopio si mettono due dischi l'uno fisso sul galvanoscopio e l'altro mobile, dopo aver caricato il disco superiore si osserva che le foglioline dell'apparecchio divaricano allontanando il disco mobile (Fig. 14) e si avvicinano se si avvicina il disco.

Interessanti esperienze si possono fare col condensatore di Epino. (Fig. 15) formato da due lastre metalliche parallele A e B, montate sopra un corsoio in modo che si possano allontanare od avvicinare. Attaccati sul lato esterno delle lastre vi sono dei pendolini la cui repulsione segna il potenziale delle lastre. Caricando la lastra A e mettendo a terra la B si osserva: 1.° che quando si mette a terra B il potenziale di A diminuisce; 2.° che avvicinando B ad A il potenziale diminuisce ancora. Intromettendo fra A e B una lastra C di vetro o ebanite il potenziale si abbassa ancora di più, il che dinota un aumento di capacità.

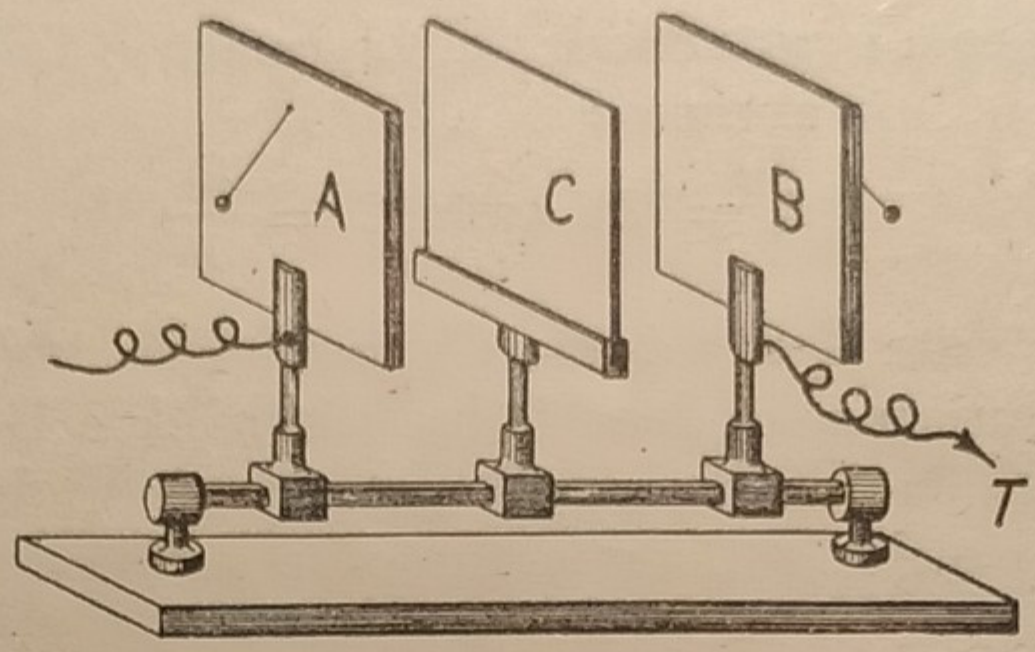


Fig. 15. - Condensatore di Epino.

Da questi ed altri esperimenti si conclude:

1° La capacità dei condensatori è proporzionale alla superficie delle armature e inversamente proporzionale alla loro distanza.

2° La capacità di un condensatore varia a seconda che si sostituisce all'aria interposta fra le armature un altro coibente.

I condensatori si caricano: 1° applicando alle armature i due poli di una sorgente di elettricità: pila, macchina elettrica od elettrostatica; 2° mettendo in comunicazione un'armatura sola con una sorgente di elettricità e l'altra armatura colla terra.

Allorchè si fa la congiunzione delle armature del condensatore col polo di un generatore di elettricità si forma per un istante una *corrente* cioè il trapasso o travaso di una certa quantità di elettricità nelle armature del condensatore e nel dielettrico; la corrente dura un istante estremamente piccolo; raggiunto lo stesso potenziale cessa ogni flusso di elettricità. Se mettiamo ora in comunicazione le armature fra loro con un filo il condensatore si scarica dando una brevissima corrente. La breve corrente si dice *corrente di spostamento*.

Se mettiamo in comunicazione l'armatura con un generatore di elettricità avente un potenziale *non costante ma variabile*, tra questo generatore e la armatura si formeranno dei flussi di cariche (ossia delle correnti elettriche) variabili a seconda del potenziale.

La capacità si misura in *Farad. Un farad è la capacità di un condensatore che si carica colla unità di quantità di*

corrente, ossia di un Coulomb, sotto una differenza di potenziale di un volt. Essendo una unità troppo grande per gli usi pratici si adopera più spesso il *microfarad* che è un milionesimo dell'unità farad.

Se si esprime la capacità C in microfarad allora si ha:

$$Q = CV\ 10^{-6}$$

8. - Unità di misura elettrostatiche ed elettromagnetiche. — Le definizioni dell'unità di quantità o massa di elettricità, di potenziale, di campo ecc. e quindi della capacità dei condensatori sono fondate sulla legge di Coulomb. Si dicono unità C. G. S. elettrostatiche.

Le sigle C. G. S. significano che esse sono derivate dal centimetro, dal grammo e dal minuto secondo. Da queste ultime derivano pure le unità di misura delle grandezze meccaniche. Esempio: la *dina*, unità di forza corrisponde alla massa, che movendosi produce una accelerazione di 1 cm. al minuto secondo; l'*erg* unità di lavoro di una dina per lo spazio di 1 cm. Perciò nell'applicazione delle formole di elettrostatica si metterà al posto delle lettere i numeri espressi in unità C. G. S. elettrostatiche.

Per la misura dei fenomeni di elettromagnetismo si è trovato più comodo adoperare delle unità di misura fondate non sulla legge di Coulomb ma su altre leggi pur adoperando come unità fondamentali il centimetro, il grammo, il secondo. Queste unità elettromagnetiche sono assai più adoperate. Ne è venuto di conseguenza che le stesse grandezze possono essere rappresentate con numeri diversi essendosi fatta la misura con *metri diversi*. Così abbiamo:

1 *Coulomb* (unità pratica elettromagnetica di quantità di elettricità) è 3×10^9 unità C G S e. s. cioè molto più grande.

1 *Volt* (unità elettromagnetica pratica del potenziale) e $\frac{1}{300}$ unità C G S e. s. cioè più piccola.

1 *Farad* (unità elettromagnetica di capacità) è 9×10^{11} unità C. G. S. e. e. e cioè molto più grande.

I *Joule* (unità pratica elettromagnetica di energia elettrica) è 10^7 erg (unità elettrostatica).

Nell'elettrodinamica (vedere capitolo 6.°) oltre alle unità pratiche vi sono le unità assolute C. G. S. che sono multiple o sottomultiple delle unità pratiche.

9. - Potere induttivo o costante dielettrica. — Si dice potere induttivo o costante dielettrica di un coibente lo aumento di capacità che subisce un condensatore a superfici parallele quando si sostituisce all'interspazio d'aria il coibente che si considera:

N. 1 Tabella della costante elettrica ε

Coibenti solidi: Caucciù naturale	da 2.12 a 2.34
» vulcanizzato	da 2.69 a 2.64
Carta impregnata di vernici isolanti	da 2.8 a 3.8
Carta comune	da 1.7 a 2.6
Ceralacca	4.3
Guttaperca	da 2.8 a 3.9
Paraffina	da 1.98 a 2.32
Resina o colofonia	da 2.48 a 2.57
Vetro ordinario	da 5 a 10
Vetro flint	da 6.9 a 7
Zolfo	da 2.6 a 3.9
Mica	da 5 a 7.8
Iuta e carta impregnata per isolamento cavi	da 3.5 a 4.3
Olii	da 2 a 3
Aria e gaz secchi	1
Porcellana	4.4

10. - Tipi di condensatori. — I condensatori elettrici sono molto impiegati nella telefonia, nella telegrafia ordinaria e sopratutto nella radiotrasmissione; nei rocchetti di Ruhmkorff; nella protezione di impianti elettrici contro le sovratensioni, negli impianti a corrente alternata per migliorare il fattore di potenza. La bottiglia di Leyda è il tipo più antico di condensatore usato nei gabinetti di fisica.

I cavi sottomarini e sotterranei per le trasmissioni telegrafiche, telefoniche e di energia elettrica si possono considerare come grandi condensatori. (Fig. 16). In quasi tutti questi cavi abbiamo uno o più conduttori di rame in comunica-

zione con una sorgente di elettricità (pile o macchine elettriche). Questi fili che costituiscono le *anime* dei cavi sono rivestiti di isolanti di caucciù, guttaperca, carta imbevuta di vernici isolanti, ecc. Sopra allo strato isolante vi sono generalmente degli involucri di piombo, di ferro in lamine o in fili attorcigliati i quali si trovano in comunicazione colla terra. Questi cavi sono quindi dei veri condensatori e ad essi potremo

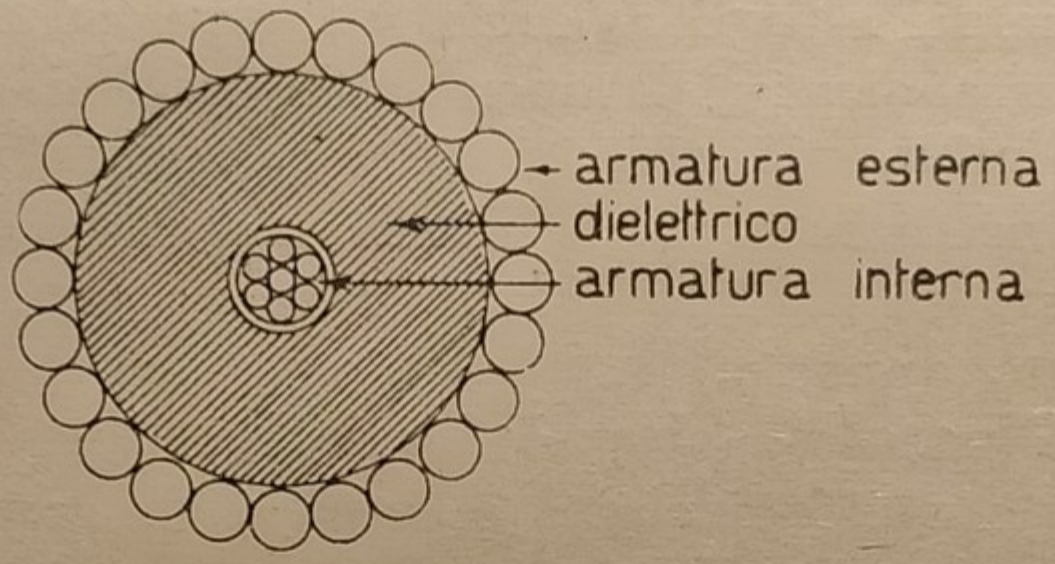


Fig. 16. - Cavo a un conduttore.

applicare tutto quanto si è detto precedentemenic e cioè:

1.° Che mettendo le due armature in comunicazione con i poli di un generatore di elettricità od *anche la sola armatura interna del cavo* con un polo si otterrà un flusso di elettricità istantaneo. Ma se il generatore ha un potenziale alternativamente di segno contrario ai suoi poli, si avranno nel condensatore flussi e riflussi di elettricità.

2.° Che la quantità di corrente accumulata od anche il flusso della carica sarà tanto più grande quanto più grande è il potenziale applicato all'anima o quanto maggiore è la differenza di potenziale rispetto alla terra.

3.° Che la quantità di corrente accumulata od il flusso sarà tanto più grande quanto più grande è la *capacità*.

Anche le linee aeree di trasmissione dell'energia elettrica ad altissimo potenziale molto lunghe si possono considerare come condensatori e danno luogo infatti a dei fenomeni di carica e scarica molto notevoli e che esamineremo nei successivi capitoli. (Vedere paragrafo sugli effetti di capacità sui circuiti a corrente alternata).

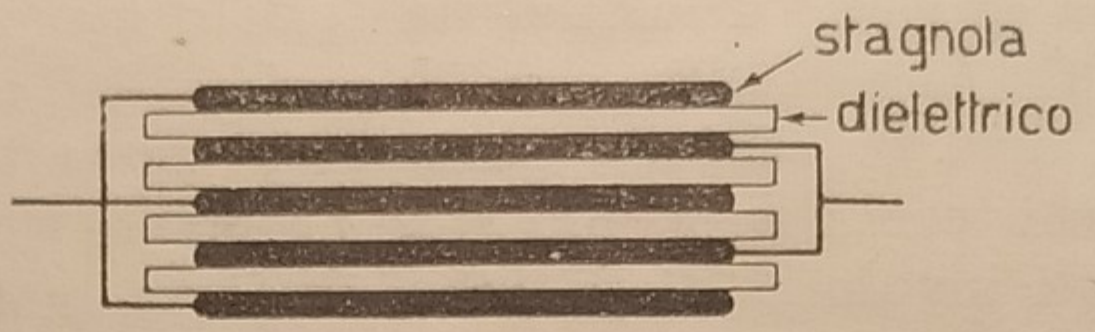


Fig. 17. . Condensatore a fogli di carta o di vetro.

I tipi principali di condensatori sono a fogli di carta o mica ed a lastre o tubi di vetro. (Fig. 17).

I condensatori a fogli di carta si fanno con dei pacchetti di fogli di carta oleata, paraffinata, intercalati con fogli di stagnola o di alluminio più stretti per lasciare un bordo di qualche centimetro intorno. Si riuniscono con linguette tutte le stagnole pari da un lato del pacchetto e tutte le stagnole dispari dal lato opposto.

Invece di paraffina si può impiegare dello stearato di piombo. Queste masse isolanti si applicano con pennello a caldo sui fogli di carta; si termina l'operazione comprimendo tutto il pacco sotto un torchietto a caldo. I condensatori a fogli di carta possono resistere fino a 500 volt di differenza di potenziale. I fogli devono essere di carta sottile e forte; se la differenza di potenziale per ciascun foglio supera i 500 V allora si adoperano due o tre fogli incollati con paraffina o altra massa isolante. La massa dei pacchi deve essere esente di ogni traccia d'umidità e bolle di aria.

I condensatori a lastre di vetro si costruiscono pure con lastre sottili di vetro alternati con fogli di stagnola; si può lasciare un'intercapedine d'aria tra una lastra e l'altra.

I condensatori Moschiki usati negli impianti industriali sono formati da tubi di vetro di 6-7 cent. di diametro e portanti all'interno e all'esterno sottilissimi strati di argento depositati chimicamente.

Un tipo recente di condensatore della *Société generale des condensateurs de Fribourg* (Svizzera) è formato da un lungo nastro di una specie di cellulosa trasparente (acetato di cellulosa) dello spessore di pochi decimi di mm. sul quale è deposto con processo chimico segreto uno strato estremamente sottile di argento. Due di tali nastri abbinati ed avvolti strettamente formano un condensatore di grande superficie sotto un piccolo volume. Il dielettrico usato è resistente molto

ad essere trapassato dalla scintilla (cioè ha una *rigidità forte*), ed ha una costante dielettrica pari a quella del vetro. L'isolante resiste fino 40-50 mila volt per mm. di spessore.

I condensatori Helsby sono fabbricati con carta e foglio di stagno arrotolati in modo da formare degli *elementi* cilindrici e poi immersi nell'olio minerale.

I condensatori si riuniscono in *serie* o in *cascata* oppure in *quantità* o in *derivazione*. (Fig. 18).

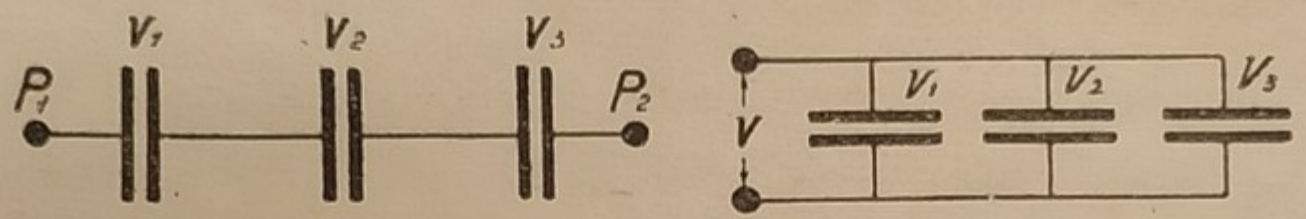


Fig. 18 - Condensatori in serie e in quantità.

Indicando con c la capacità di un condensatore; n il numero dei condensatori *supposti uguali*; V la differenza di potenziale; Q la carica complessiva; C la capacità totale della batteria di condensatori si hanno le seguenti relazioni:

Condensatori in serie: $C = \frac{c}{n}$ $\quad V = \frac{n}{c} Q$ $\quad Q = \frac{c V}{n}$

Condensatori in quantità: $C = n\ c$ $\quad Q = n\ c\ V$

11. - Capacità di alcuni condensatori. — La capacità dei condensatori dipende solo dalle dimensioni geometriche del sistema; superficie, distanza e forma delle armature; dipende poi come si è visto dal dielettrico interposto.

1.° *Condensatori piani.* — I condensatori piani, formati da due armature parallele, sottili di superficie S cmq. alla distanza di *d cm.*; con interposizione di un dielettrico avente un potere induttore specifico ε hanno la capacità in *unità elettromagnetiche* espressa in *microfarad*:

$$C = \frac{\varepsilon\ S}{4\ \pi \times d \times 9\ 10^5}$$

2.° *Condensatori cilindrici* sono quelli rappresentati dai cavi aventi un'anima interna ed un involucro esterno separati

da un isolante. Essendo r_1 il raggio in cm. dell'anima interna e r_2 quello della superficie interna dell'involucro esterno, la capacità per l *centimetri* di lunghezza è espressa in microfarad:

$$C = \varepsilon \frac{0{,}434\ l}{2\ log\ \frac{r_2}{r_1} \times 9 \times 10^5}$$

3.° *Capacità delle linee elettriche.* — Abbiam detto come due fili di una linea di trasmissione formano anche essi le armature di un condensatore. Ciascun filo forma pure rispetto alla terra una armatura di condensatore. Chiamando d la distanza di due fili paralleli in cm., r il raggio dei fili, l la lunghezza in cm., la capacità fra i due fili è data:

$$C = \frac{0{,}434 \times l}{4 \times log\ \frac{d}{r} \times 9 \times 10^5} \text{ microfarad}$$

La capacità tra un filo alto D cm. sulla terra e la terra stessa è espressa:

$$C = \frac{0{,}434 \times l}{2\ log\ \frac{2\ D}{r} \times 9 \times 10^5} \text{ microfarad}$$

Come si vede la capacità delle linee aumenta diminuendo l'altezza o meglio il rapporto $D:r$.

ESEMPI. — 1.° Calcolare le dimensioni di un condensatore a fogli di carta paraffinata avente la capacità di 1 microfarad.

R. Supposto che la carta paraffinata abbia uno spessore di 2/10 di mm. ossia cm. 0,02 e che la costante dielettrica sia quella media della paraffina ossia $\varepsilon = 2$ avremo:

$$1 = \frac{2\ S}{4\ \pi \times 0{,}02 \times 9 \times 10^5} = \frac{S}{113040}$$

e quindi S = 113040 cmq. Ammesso che i fogli di stagnola abbiano 20 × 15 cm. ossia 300 cmq., per fare il condensatore di 1 microfarad biso-

gnerà impiegare 113040/300 = 373 fogli di carta alternati con altrettanti di stagnola.

2.° Calcolare la capacità chilometrica di una linea rispetto alla terra e fra due fili supposta una distanza orizzontale di 50 centimetri fra loro e di 10 m. di altezza sul suolo. I fili hanno un raggio di sezione di 0,5 cm.

R. La capacità fra i due fili sarà:

$$C = \frac{1000 \times 100 \times 0.434}{4 \log \frac{50}{0.5} \times 9 \times 10^5} = \frac{0.434}{36 \log 100} = 0.006$$

La capacità fra ciascun filo e la terra al Km.:

$$C = \frac{1000 \times 100 \times 0.434}{2 \log \frac{2 \times 1000}{0.5} \times 9 \times 10^5} = \frac{0.434}{18 \log 4000} = 0.0067$$

La capacità in microfarad delle linee composte da due fili paralleli varia fra 0.004 e 0.009 per chilometro. Spesso nei testi di elettricità il microfarad si indica col simbolo μ F.

NB. — Se la linea è trifase a tre fili disposti ai vertici di un triangolo equilatero — neutro escluso — la capacità in microfarad è doppia delle capacità calcolata per 2 fili. La differenza di potenziale da applicare è quella col centro neutro.

Data la capacità di un condensatore si trova la carica in *Coulomb* moltiplicando la capacità per la differenza di potenziale in *Volt*, e per la 10^{-6} se la capacità è espressa in microfarad.

Nel capitolo relativo alle correnti alternate si daranno le formole per calcolare le correnti nei condensatori.

ESEMPIO. — Un filo telegrafico lungo 300 chilometri, diametro 4 mm. e posto a 4 m. di altezza sul suolo ha (conformemente alla formola 2.a sulle linee elettriche) una capacità di 0.006 microfarad al chilometro, Quanti coulomb assorbirebbe il filo per ogni emissione di segnale con una pila di 100 Volt.

$$Q = 300 \times 100 \times 0{,}006 \times 10^6 = 0{,}000180 \text{ coulomb}$$

PROBLEMI DA RISOLVERE: 1.° Quale è la capacità di un cavo sottomarino (condensatore cilindrico) in cui $r_1 = 2$ mm., $r_2 = 6$ mm., costante dielettrica $\varepsilon = 3$. La lunghezza del cavo è di 500 chilometri.

2.° Si hanno 10 condensatori aventi ciascuno una capacità di 0.5 microfarad. Qual'è la capacità totale della batteria mettendo i condensatori in serie e in parallelo. Quanti coulomb possono immagazzinare sottoponendo la batteria nei due casi a 20.000 volt di differenza di potenziale?

12. - Energia nei condensatori. — Quando si carica un conduttore o un condensatore bisogna spendere una certa quantità di energia per spostare le cariche elettriche e vincere le forze che si sviluppano. Ogni aggiunta che si fa nella carica di un'unità di elettricità (Coulomb) fa aumentare il potenziale del conduttore. Supposto di suddividere una carica Q in tante cariche elementari di un Coulomb ciascuna, il lavoro o energia accumulata sarà proporzionale al numero Q di Coulomb per il potenziale medio fra zero ed il massimo V raggiunto quando la carica è completa. Cioè l'energia accumulata sarà espressa da:

$$W = Q \frac{1}{2} V = \frac{QV}{2}$$

ossia essendo per i condensatori $Q = CV$ dove C è la capacità in Farad, si ha:

$$W = \frac{1}{2} C \cdot V^2$$

Se Q è espresso in unità *Coulomb*, V in volt, C in farad l'energia accumulata resta espressa in unità detta *Joule*. Questa unità di misura equivale esattamente a 0,102 chilogrammetri.

13. - Macchine elettrostatiche a strofinio ed a influenza. — La più semplice forma di macchina elettrostatica è data dall'*elettroforo di Volta* (Fig. 19). Consiste in due dischi di materia isolante (ebanite, colofonia, ceralacca) a ciascuno dei quali è applicata un'armatura metallica. Il disco superiore è munito di una impugnatura isolante. Prima di adoperare l'apparecchio conviene molte volte di essicarlo presso una stufa per far sparire ogni traccia di umidità che essendo conduttrice renderebbe vano ogni esperimento.

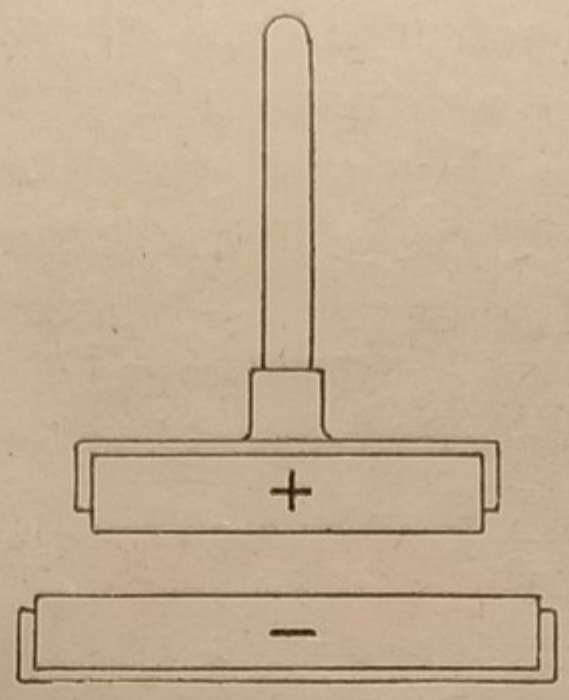


Fig. 19 - Elettroforo di Volta.

Si elettrizza il disco inferiore *negativamente* sfregandolo con una pelliccia o batuffolo di seta; si preme sul disco elettrizzato superiore mentre con un dito toccando la armatura mobile si esporta verso terra la carica negativa che si forma per influenza. Levato il dito, si stacca l'armatura carica col segno + e con questa si può far scoccare scintille o caricare una bottiglia di Leyda. Dopo, premendo nuovamente i due dischi ritoccando l'armatura col dito e poi levando il disco si può ottenere una nuova carica e così via.

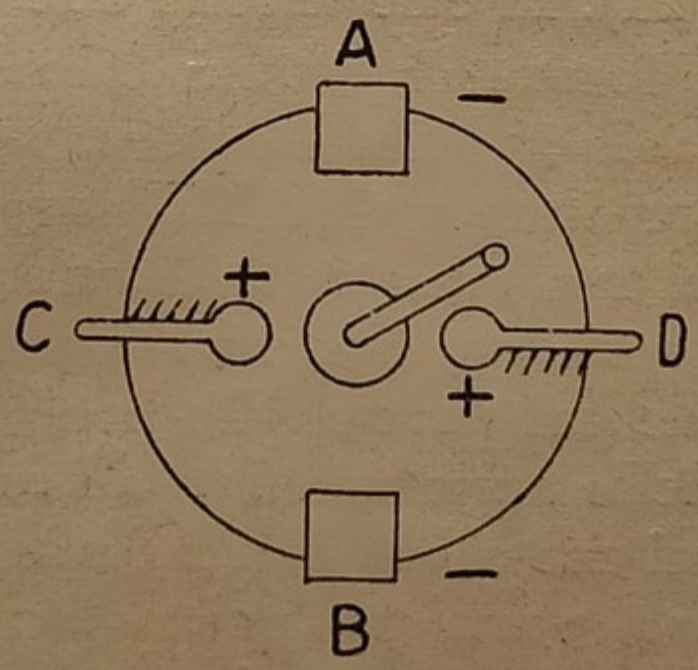


Fig. 20 - Macchina a strofinio di Ramsden.

La macchina a strofinio di Ramsden è formata da un disco di vetro montato su asse girevole con due supporti e munito di manovella. Il disco di vetro (Fig. 20) è serrato, alle estremità di un diametro, da due cuscinetti di cuoio metalizzato A e B; questi sfregando provocano sul vetro una elettrizza-

zione positiva. Alle estremità di un altro diametro a circa 90° dal primo vi sono due mazzi di punte sottili rivolte verso il vetro a brevissima distanza da questo. Durante il movimento le punte metalliche e l'armatura nel quale sono piantate si elettrizzano col segno — verso il disco e + sull'armatura che porta le punte. L'elettricità negativa sfugge per le punte e neutralizza il vetro. Così si può raccogliere l'elettricità + sull'armatura delle punte e, volendo, quella negativa dai cuscinetti.

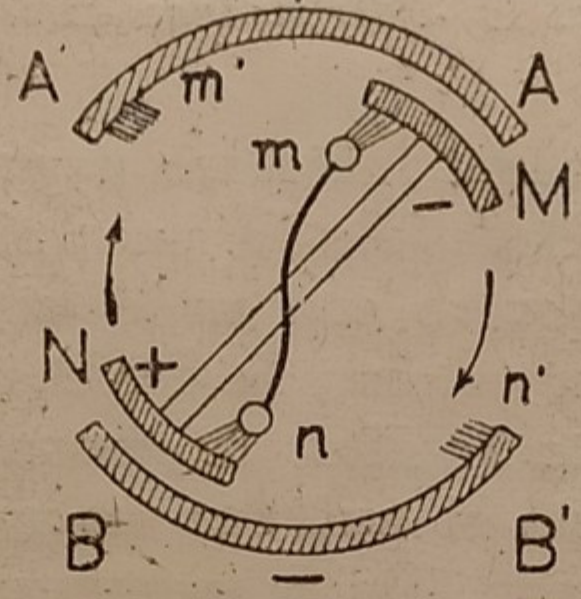


Fig. 21 . Macchina a influenza detta duplicatore di Belli.

Il *duplicatore di Belli* è invece il prototipo delle macchine ad influenza (Fig. 21). In esso vi sono due armature fisse di lamina metallica a forma di settori cilindri AA_1 BB_1 (per esempio due stagnole applicate internamente ad un cilindro di ebanite) e due armature mobili MN pure metalliche in forma di settori cilindrici ma più stretti di quelli fissi (per esempio due striscie di stagnola applicate esternamente ad un cilindro di ebanite coassiale col primo). Le armature mobili possono ruotare nel cavo delle armature fisse a breve distanza fra loro.

Due spazzolini metallici fissi *m n* uniti fra loro da filo metallico strisciano verso la parte concava delle armature M N quando queste, ruotando, si trovano presso gli orli A e B. Due altri spazzolini m_1 n_1, sono fissati alle due armature esterne presso l'orlo A_1 e B_1. Supponiamo di far girare le armature M N nel senso delle freccie e di dare una piccola carica + alla AA_1 o — alla BB_1; i settori M e N affacciandosi alle prime si caricano per influenza col segno — e + mentre le cariche nelle faccie concave si neutralizzano fra loro a mezzo delle spazzole *m n*. Le armature mobili M N prose-

guendo incontrano le spazzole m_1 e n_1 e si scaricano sulle armature fisse aumentando ad ogni giro le rispettive cariche e il potenziale.

14. - Scariche nei gaz rarefatti. — Quando si provoca una scarica di gaz rarefatto esso diventa più conduttore e cioè gli efflussi di corrente tendono ad aumentare fino a un certo limite: più in là occorre elevare la differenza di potenziale per ottenere la scarica.

Interessanti esperienze si possono fare coll'uovo elettrico e coi tubi di Geissler. L'uovo elettrico è un tubo ovoidale in cui entrano due aste di ottone munite di sferette mantenute ad una certa distanza. Il tubo si può adattare al piatto di una macchina pneumatica mentre i due reafori (morsetti esterni delle aste) si mettono in comunicazione con una macchina elettrostatica o con un rocchetto di Ruhmkorff. Appena si comincia la rarefazione si vedono formarsi delle striscie luminescenti colorate in rosso viola o diversamente se vi sono gaz speciali invece di aria; alla pressione di alcuni millimetri di mercurio diventano color porpora e sfumate. Se la pressione scende sotto ai 2 mm. il polo negativo (*catodo*) si circonda di un involucro luminoso e dal polo positivo (*anodo*) si stacca un fuso di luce rosea. Le due luci sono separate da uno spazio scuro detto di Faraday. Continuando la rarefazione il fuso rossastro si stratifica; ma a questo punto è difficile coll'uovo elettrico di spingere la rarefazione e occorre ricorrere a tubi con reofori di alluminio intorno ai quali si fa fondere il vetro per rendere assolutamente impermeabile all'aria l'attraversamento. Aumentando con questi tubi la rarefazione tra 2 e 1 millimetro circa di mercurio si osserva una colonna luminosa partire dall'anodo fin quasi al catodo lasciando uno spazio oscuro di mezzo. Si dice *raggio positivo*; esso si inflette sotto l'azione di una calamita come se fosse una corrente elettrica mobile. A questo punto lo spazio oscuro si estende, il raggio positivo si accorcia e contemporaneamente si estende un leggero bagliore del negativo verso il positivo con un distacco oscuro. I raggi semioscuri emessi dal negativo in questo periodo si dicono *raggi catodici*, essi hanno la proprietà di riscaldare fortemente i corpi solidi che si trovano sulla traiettoria fino a renderli incandescenti; eccitano la fluorescenza nei diversi

corpi contenuti nel tubo e delle colorazioni diverse a seconda dei diversi gaz residui rimasti. E' provato che essi sono formati da un vero flusso di elettroni proiettati dal catodo.

Tali raggi incontrando il vetro del tubo contro il catodo lo riscaldano, lo rendono fluorescente con colori azzurri e verdi e provocano al di là del vetro esternamente dei nuovi raggi detti raggi X che hanno la proprietà di attraversare ostacoli di corpi leggeri come carta, cuoio, legno, lastre d'alluminio ecc. e di impressionare le lastre fotografiche poste al di là degli ostacoli segnandovi le ombre degli oggetti metallici o più pesanti incontrate nel percorso. Così si possono fotografare gli oggetti contenuti in una scatola, in un borsellino, ecc. Sulla proprietà dei raggi X o raggi Roentgen è fondata la *radioscopia* e la *radiografia* che formano una preziosa applicazione della chirurgia. Proiettando i raggi X di un tubo catodico attraverso le parti di un corpo umano sopra uno schermo di materia fluorescente (sali di bario) o sopra lastre fotografiche si possono vedere e fotografare le anomalie interne e specialmente delle ossa, le deformazioni, le rotture ed i corpi metallici incastrati.

Le scariche luminescenti nel primo periodo di rarefazione con formazione di un fuso di luce rossa è stato utilizzato per creare delle lampade formate da lunghi tubi contenenti del *neon* (gaz raro dell'aria). La luce emanata da questi tubi è rosso aranciata e serve per scopo decorativo.

15. - Jonizzazione dei gaz. — Con questo nome si indica una scissione delle molecole dei corpi gazosi in particelle cariche di elettricità negativa, in elettroni e in particelle cariche di elettricità positiva. Tale scissione è parziale nei gaz e si ottiene in diversi modi: colle scariche elettriche, sia silenziose, sia scintillanti, dei corpi conduttori, specialmente di forma appuntita; coi raggi di luce violetta ed ultravioletta; coi raggi emanati da un metallo speciale detto radio; coi raggi catodici; colle altissime temperature, ecc. Anche i raggi solari inducono una notevole ionizzazione dell'aria.

La caratteristica dei gaz ionizzati è che essi diventano parzialmente conduttori invece di conservarsi isolanti. Perciò mettendo in gaz ionizzato dei corpi carichi di elettricità, questa in un tempo più o meno lungo scompare; così pure se si

mettono in un gaz ionizzato due reofori di una sorgente di elettricità (pila, dinamo, ecc.) si nota con istrumenti il passaggio di una corrente. Nei gaz ionizzati scoccano più facilmente le scintille. Sottraendo un gaz ionizzato ai raggi ionizzanti esso perde a poco a poco la proprietà conduttrice e ritorna isolante.

Un'altra proprietà curiosa affine è la seguente: i metalli e specialmente alcuni ossidi metallici quando siano colpiti da raggi di luce violetta ed ultravioletta emanano elettroni. Quindi un corpo carico negativamente, isolato, colpito dai detti raggi perde subito la sua elettrizzazione; i corpi neutri passano allo stato di carica positiva.

Abbiamo accennato che i metalli e gli ossidi metallici allo stato incandescente emanano spontaneamente a minor temperatura corpuscoli positivi, ad alta temperatura degli elettroni. Il flusso elettronico lanciato fuori dai corpi incandescenti è tanto più libero e più grande quando maggiore è il vuoto. Su questa proprietà si fonda la costruzione delle *valvole* o *tubi elettronici*, ecc. impiegati nella telegrafia e radiotelefonia. In queste valvole vi è sempre un filamento reso incandescente col passaggio di una corrente e una piastrina metallica che lo involge (placca) che forma il polo positivo.

16. - Rigidità elettrostatica dei coibenti. — Quando la d. di p. tra due conduttori separati da un isolante, oppure il gradiente (vedi definizione parag. 6) ha raggiunto un certo valore l'isolante cede e lascia scorrere l'elettricità sotto forma di una scintilla perforante.

Si dice *rigidità* la tensione in volt o chilovolt sotto la quale un isolante dello spessore unitario (mm o cm) viene perforato dalla carica disruptiva.

In un campo elettrico omogeneo ed uniforme la tensione esplosiva fra due conduttori è proporzionale allo spessore. Ma i campi elettrici che si hanno nella pratica non sono omogenei e i materiali non sono uniformi (cartoni, mica, aria, ecc.) Nei cavi sotterranei il gradiente del potenziale è più forte verso l'anima che verso l'armatura esterna e la differenza è tanto più sensibile quanto più l'anima conduttrice è piccola,

per cui l'isolante che si trova a contatto coll'anima è più sollecitato che non verso l'esterno.

La rigidità varia molto a secondo della forma degli elettrodi fra i quali avviene la scintilla. Tra punte la distanza è minore che non tra due superfici piatte o fra due sfere. La rigidità varia colla temperatura e diminuisce aumentando lo stato igrometrico; diminuisce coll'aumentare degli spessori, coll'aumentare della durata di applicazione. Quindi nelle prove di perforazione bisogna tener conto di tutti questi elementi.

Risultati più sicuri si ottengono con elettrodi a sfere; sostituendo delle sfere alle punte la scintilla esplosiva a pari tensione avviene a minor distanza fino a tensione di 170 mila volt. Il che dimostra che aumentando la curvatura degli elettrodi e mantenendoli lisci e lucidi i coibenti interposti resistono molto più. Caratteristico è il comportamento degli olii; sostituendo ad uno spinterometro a punte delle sferette di 20 mm. la distanza si può ridurre quasi ad un terzo. (Confrontare colonne 9-10 e 12-13 della tabella 3, *vedi pag. seg.*)

17. - Fenomeno corona. — Abbiamo visto in principio che in un conduttore, quando è elettrizzato si esercitano delle forze di repulsione interne fra i diversi elementi in cui si può suddividere la carica di modo che le cariche si portano alla superficie. La forza che spinge in fuori la carica in ciascun punto di un conduttore costituisce la *pressione elettrostatica* e varia col quadrato della densità.

Se parallelamente al conduttore elettrizzato, vi è un altro conduttore, la pressione elettrostatica aumenta per l'effetto delle forze esterne e della condensazione delle cariche.

Aumentando tra due conduttori la differenza di potenziale, l'aria perde il suo potere isolante si dice che perde la sua *resistenza*. Le molecole dei gas componenti l'aria attratte e poi respinte tendono ad esportare le cariche e diminuire il potenziale; si ha cioè una dispersione di energia che si trasforma in calore, movimento d'aria, effetti chimici. La scarica si dice scarica silenziosa o conduttiva ed è accompagnata da un effluvio luminoso.

Questo fenomeno succede anche sui fili di trasmissione di energia quando la differenza di potenziale è portata molto

TABELLA N. 3 — Distanze esplosive e di perforazione.

VOLT	ARIA			MICA	Porcellana	Paraffina solida	Olio di paraffina	Olio per trasform. (vaselina)	Olio di resina	Olio di resina	Olio di olivo naturale	Olio di olivo essicato	Olio di olivo essicato
	Fra due punte acute d'ago mm	Tra punta e un piano	Tra due sfere di 20 mm	Tra due piani	Tra due piani	Tra due piani	Tra punta e piano	Tra punta e piano	Tra punta e piano	Tra due sfere 20 mm	Tra punta e piano	Tra punta e piano	Tra due sfere 20 mm
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
10000	13	10	5	0,085	0,7		4	2	3	2	1	1	1
20000	26	24	10	0,215	1.5	—	9	4	8	3	4	2	1,5
30000	41	40	20	0,37	2,4	0,5-1,5	14	8	14	4	8	5	2
40000	58	58	32	0,55	3,5	1,5-3,0	20	14	22	5	15	9	3
50000	82	80	50	0,75	4,7	2-4,5	26	20	30	7	24	16	4
60000	114	104	80	0,98	5,9	3-6,5	33	28	38	8	35	26	5
70000	146	132	119	1,2	7,1	4,5-8,5	40	30	46	9	47	38	6
80000	180	163	143	—	8,4	6-11,5	47	44	55	11	60	51	7
90000	212	196	189	—	9,7	8,5-14	54	54	64	12	73	65	8
100000	243	230	229	—	11,2	10,5-16	62	04	73	14	86	79	9
110000	273	270	270				70	74	83	17	100	93	10
120000	301	310	310				78	84	93	20	114	108	11,5
130000	329	350	350				86	96	103	26	129	124	12
140000	354	390	390				95	108	113	32	140	143	13
150000	381	440	440				104	110	123	40	160	160	14
160000		470	470				113	134	135	50	178	180	15

NB. - Le distanze indicate si riferiscono ad esperimenti con tensioni alternate industriali e sono espresse in millimetri.
Impiegando tensioni ad alta e altissima frequenza le distanze esplosive si riducono sensibilmente.
Dividendo i volt per le distanze esplosive si ha la rigidità per mm.

alta e quanto più piccolo è il diametro del filo. In tal caso il fenomeno si dice *corona*.

Il fenomeno corona è affatto trascurabile per le alte tensioni fino a 50 o 70 mila volt. Ma aumentando la differenza di potenziale fra i fili, se il diametro è piccolo, avviene una certa *tensione critica* per cui l'aria cede di resistenza e la dissipazione dell'energia aumenta rapidamente. Nella notte i fili diventano luminosi ed emanano un fruscìo.

Le perdite che si hanno per *corona* sono proporzionali al quadrato della differenza di potenziale fra i fili e alla radice quadrata del rapporto fra il diametro e la distanza. La differenza di potenziale a cui cominciano a sentirsi gli effetti corona è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta e proporzionale alla densità dell'aria.

L'effetto di dispersione aumenta se il filo presenta delle punte; anzi con fili spinosi appositamente fatti con 400 punte sottili al metro l'effetto corona comincia al potenziale di 20 mila volt se i fili spinosi sono a 50 cm. di distanza e cresce rapidamente verso 30 e 40 mila.

18. - Isolanti impiegati nella pratica e loro uso. — Gli isolanti impiegati nelle costruzioni elettriche si possono dividere in isolanti inorganici ed in isolanti organici a seconda che appartengano alla chimica inorganica od a quella organica. Vi sono isolanti naturali ed artificiali, semplici e composti, ecc. Ecco l'elenco dei principali:

1.° *Vetro.* — Il vetro è un silicato composto di silice (quarzo o sabbie pure) soda, potassa, calce. Vi sono parecchie qualità di vetro che si distinguono per il grado di trasparenza, di temperatura, di fusione. Per esempio si ha: il vetro bianco comune, il vetro da bottiglie nere, il cristallo, il vetro di Boemia, il flint, lo smalto.

Il vetro è un buon isolante ma è fragile; salvo che per certe qualità esso si rompe facilmente se è sottoposto a riscaldamento e raffreddamento brusco. Col vetro si fanno tubi, aste per costruzione di apparecchi elettrici. Si costruiscono pure isolatori per le linee elettriche di vetro verde anche per altissime tensioni.

Lo smalto si adopera per ricoprire con una superficie vitrea i metalli; esso è formato da silice, soda o potassa, ossido

di zinco, stagno e piombo; si applica a freddo come una vernice poi si riscaldano i pezzi al calor rosso per fondere lo smalto. Lo smalto serve per la fabbricazione di corpi riscaldanti e resistenze formate da filo sottile piegato a zig-zag e annegato in uno strato di smalto applicato su lamine di ghisa. Lo smalto tiene a posto il filo, lo isola. Occorre che il coefficente di dilatazione dello smalto sia uguale a quello della ghisa.

2.° *Quarzo*. — Si fabbricano tubi ed oggetti di quarzo fuso per usi elettrotecnici e che hanno la caratteristica di poter essere portati ad alta temperatura (1500°) e raffreddati senza pericolo di spaccarsi; servono per forni elettrici e per lampade elettriche speciali.

3.° *Porcellana*. — La porcellana è una miscela di caolino, feldspato e quarzo che si prepara a freddo macinando i detti materiali con acqua, mescolandoli e spappolandoli in modo da ottenere una pasta omogenea e finissima al tatto. Colla pasta si confezionano isolatori d'ogni genere che poi si cuociono in forni a cupola fino a 1300° e 1500° in due riprese prima senza smalto e poi con smalto.

Il caolino è un'argilla pura (silicato d'alluminio) e proviene da disgregazione di roccie come il granito, il porfido, ecc. L'argilla impura ricca di ossido di ferro forma il materiale per la fabbricazione dei mattoni e laterizi. Il caolino è quasi infusibile.

Il feldspato (silicato di alluminio e potassio) e il quarzo (silice pura) formano la parte fusibile e agglomerante della porcellana.

4.° *Amianto*. — L'amianto lo si cava allo stato fibroso da certe rocce silicee; è un silicato di magnesio, difficilmente fusibile. Con le fibre più lunghe si fanno dei fili e con questi dei tessuti incombustibili. Colle fibre più corte si fanno cartoni. L'amianto entra in miscela con altri isolanti agglomerati. Mescolato col cemento Portland e sotto enormi pressioni forma l'*eternit*, materiale spesso adoperato in forma di lastre come isolante, come separatore invece del marmo. Il potere isolante sia dell'amianto che della eternit non è molto grande; perciò, si adopera questo materiale solo come isolante di bassa tensione. Resiste bene al calore moderato, ma riscaldato ad alta temperatura perde il potere agglomerante e quindi la resistenza e la durezza.

5.° *Grès e materiali refrattari.* — Il grès è un ottimo isolante, meno pregiato della porcellana e meno resistente. E' poco adoperato per usi elettrotecnici: però con esso si fanno isolatori speciali per alte tensioni. Resiste bene al calore, non si può ottenere in spessori sottili; è più poroso della porcellana.

I materiali refrattari: *magnesite* (ossido di magnesio quasi puro), *dolomite* (ossido di calcio e magnesio) sono isolanti alle ordinarie temperature ma ad alta temperatura, fra 1000° e 1500° diventano buoni conduttori. Non sono impiegati come materiali isolanti.

6.° *Marmo ed ardesia.* — Il marmo di Carrara è molto impiegato per fare i quadri degli apparecchi elettrici; si adopera in lastre da 2 a 3 centimetri di spessore. Il grado di isolamento non è grande per cui il suo uso è limitato ai bassi potenziali fino a 500 V.

L'ardesia nera è impiegata per fare le basi di piccoli apparecchi elettrici a bassa tensione; il potere isolante è inferiore al marmo; certe qualità di ardesia sono conduttive. Si migliora l'isolamento verniciando l'ardesia con vernici isolanti e impregnandola di paraffina in bagno caldo.

7.° *Mica e micanite.* — E' un coibente molto pregiato perchè meccanicamente resistente, pieghevole, refrattario all'umidità, d'altissimo potere isolante e resistente al calore.

Si trova in commercio in fogli o placche di spessore variabile, trasparenti o leggermente colorate; questi fogli si lasciano sfaldare in fogli sottilissimi quasi all'infinito. Uno spessore di un quarto di millimetro si lascia perforare a 25-30 mila volt.

E' un silicato complesso di alluminio, sodio, calcio, magnesio e potassio.

Colle scaglie di mica si fabbrica la carta e la tela di micanite. Sopra un foglio di carta sottile e forte spalmato di gomma lacca od altra gomma isolante si stendono delle scaglie sottilissime di mica in modo da ricoprire la carta. Poi si mette sopra un altro foglio di carta ed un altro strato di fogile di mica, e così via. I fogli stratificati vengono pressati a caldo (100°) con presse, calandre e laminatoi e si ottengono così fogli di carta pieghevoli di alto potere isolante e resistenti al calore (200°).

Arrotolati al tornio su tubi di ferro a caldo e sotto pressione, coi fogli di micanite si fanno dei tubi anche di grosso spessore, compatti, resistenti, sonori e di altissimo potere isolante.

8.° *Zolfo.* — Buon isolante ma non consigliabile per fissare parti di ferro dentro ad isolatori perchè facilmente il ferro a contatto dello zolfo passa allo stato di solfuro ed ingrossandosi di volume fa spaccare l'isolatore.

9.° *Osso, avorio, galatite.* — Sono discreti isolanti e si adoperano per fare piccoli oggetti isolanti per basso potenziale, apparecchi di laboratorio, bottoni di campanelli, pulsanti e manici per interruttori, ecc.

La galatite è un prodotto che si cava dal latte e si ottiene in masse bianche o colorate che si possono lavorare al tornio come l'osso e l'avorio al quale si assomiglia perfettamente.

10.° *Colofonia* o pece greca è un residuo della distillazione del legno; è una massa gialla, friabile. Si scioglie nell'alcool; si mescola con altre sostanze agglomeranti o ad altre vernici per aumentare il potere isolante.

11.° *Gomma lacca.* — E' una resina che trasuda da alcune piante tropicali delle Indie inglesi in seguito a puntura di un certo insetto e si trova in commercio sotto forma di scaglie gialle o rosso brune. La gomma lacca rammollisce e si agglomera oltre i 100°. Sciogliendola nell'alcool anidro e nell'etere a caldo a bagno maria, dà una vernice usitatissima per ricoprire avvolgimenti dei fili; e per verniciare metalli; per fabbricare la carta e la tela micanite, ecc. La verniciatura con gomma lacca dei rivestimenti tessili dei fili impedisce l'assorbimento dell'umidità. E' un prodotto commerciale assai diffuso e trovasi presso tutti i droghieri.

12.° *Gomme.* — Oltre alla gomma lacca si adopera la *gomma copale* che pure si scioglie in alcool, acqua ragia ed entra nella composizione delle vernici per usi elettrotecnici.

Ma la gomma più usata e che forma la base dell'isolante più diffuso per fili è il *caoutchou* (caucciù) o gomma elastica. Questa gomma proviene da alcune piante tropicali facendo delle incisioni nella corteccia. Dalle incisioni scola un lattice che si rapprende all'aria e forma una gomma molto elastica ed isolante. Con delle macchine questa gomma viene mescolata e lavorata e se ne fanno fogli, nastri coi quali si isolano i fili

conduttori. La gomma si rammollisce verso 80° e 100°, quindi non è consigliabile l'uso di questo isolante per conduttori che possono scaldarsi. Per esempio non è consigliabile affatto per isolare i fili che servono a fare gli avvolgimenti delle macchine elettriche, poichè queste sono soggette a scaldarsi.

Il caucciù mescolato col 2 - 3 % di zolfo (incorporato mediante impastatrici e laminatoi) e riscaldato intorno a 100° - 200° forma il caucciù vulcanizzato o gomma bianca o rossa che tutti conoscono. Il caucciù vulcanizzato intacca il rame nudo perciò i fili isolati con questa qualità devono essere stagnati.

13.° *Olii vegetali e minerali.* — Tutti gli olii sono dei forti isolanti e posseggono un grado di rigidità assai superiore all'aria, ma gli olii vegetali di lino, canape, ecc. esposti lungamente all'aria, si alterano, si ossidano mentre gli olii minerali, provenienti dalla distillazione del petrolio, si alterano molto meno. Il potere isolante degli olii dipende dalla purezza e dalla umidità che contengono. Gli olii si essicano mantenendoli ad una temperatura di 110° - 120° per parecchie ore; ma se si lasciano esposti all'aria assorbono facilmente l'umidità e perdono buona parte dell'alto potere isolante. Gli olii minerali sono molto usati per isolare e raffreddare i trasformatori, per interruttori ad alta tensione, reostati, ecc.

Fra gli olii più impiegati vi è l'olio di resina che si cava dalla distillazione delle resine vegetali; l'olio di vasellina olio minerale assai pregiato e puro.

14.° *Ozocherite* o cera fossile è un prodotto che assomiglia molto alla cera comune; si fonde a bassa temperatura, si scioglie in altri liquidi isolanti. Serve per formare miscele isolanti per la fabbricazione dei cavi sotterranei.

Dello stesso genere è la *paraffina* che si ottiene dalla distillazione del petrolio; la paraffina è bianca e fortemente isolante.

15.° *Asfalto, bitume.* — Sono prodotti che avanzano dalla distillazione del petrolio greggio; il catrame minerale si ottiene dal lavaggio del gaz nelle fabbriche di gaz illuminante o del gaz dei gazogeni per forni. Sono tutti più o meno solubili in alcool, etere, in olio, acqua ragia, ecc. e servono a fare delle vernici e delle masse isolanti per la fabbricazione dei

cavi sotterranei; servono per imbevere le fibre tessili di copertura ed isolamento dei fili e dei cavi.

16.° *Carta, cartone, bachelite e fibra.* — Il legno è un ottimo isolante se è ben essicato, ma esposto all'aria umida assorbe facilmente la umidità e perde ogni potere isolante. Per impedire questo difetto si può far bollire il legno ben essicato dentro ad un bagno di paraffina fusa, di olio o miscele di olio e bitume, ecc.

Un comportamento simile ha la carta; perciò la carta che si usa moltissimo per isolamento dei cavi e dei fili, deve essere impregnata di vernici a base di olio minerale, con sciolto della ozocherite, bitume.

Molto diffuso per l'isolamento delle matasse dei fili nelle macchine elettriche è il *cartone pressato o presspan*; questo cartone, formato da cellulosa, viene impregnato con qualche vernice essicante e poi pressato con calandre in modo che il cartone riesce lucido, meccanicamente resistente, pieghevole.

Una vernice sintetica molto adoperata è la bachelite; essa si trova in commercio sotto la denominazione A e B; è solubile in alcool e altri solventi. Con questa vernice si imbeve la carta sottile di pura cellulosa e con questa si fanno tubi, lastre bastoni, isolanti tubolari; questi prodotti riscaldati a 110° fanno diventare la bachelite insolubile, dura e molto resistente.

Colla pasta di legno si fa invece la cartapesta che non serve come isolante, ma per lavori di cartonaggio necessari negli apparecchi elettrici: rocchetti, tubi, scatole di protezione per interruttori. Gli oggetti si possono ottenere per stampaggio della pasta umida.

Un isolante ottimo è l'*acetato di cellulosa* col quale si fa la seta artificiale ed ottenuto con cellulosa sciolta nell'acido acetico. Non è infiammabile come il celluloide e non più del legno comune. Si fabbricano lastre e nastri; uno spessore di 1 mm. resiste a 26000 volt; 0,3 mm. a 20000. La cellulosa ottenuta con questo sistema è trasparente e resistente quanto la mica. Una qualità detta *cellon* ha una rigidità di 40 a 50 mila volt per mm. di spessore.

17.° *Fibra.* — La fibra si ricava dalla segatura del legno, depurata con mezzi chimici da alcune impurità; viene quindi agglomerata con sostanze speciali e compressa ad altissime pressioni. Si ottiene così una specie di legno artificiale dur's-

simo in forma di lastre d'ogni spessore, di bastoni, di tubi che si possono lavorare al tornio. Di solito la fibra è colorata in rosso, in grigio o in nero. Ha un potere isolante molto inferiore al presspan e alla bachelite, per cui il suo uso è limitato alla fabbricazione di piccoli oggetti isolanti per basse tensioni come ranelle, tubetti isolanti, basette.

18.° *Isolanti tessili.* — Gli isolanti tessili impiegati per rivestire i fili conduttori sono il lino, la canapa, il cotone e la seta, la manilla, la juta in filaccie, in fili, in tessuti. Come il legno e la carta non hanno grande potere isolante perchè assorbono facilmente l'umidità dell'aria. Perciò tutti i lavori di avvolgimenti con fili coperti di tessile devono essere finiti con essicamento e quindi colla verniciatura od impregnatura di masse e vernici isolanti e antiigroscopiche. L'impregnatura si compie dentro autoclavi nelle quali prima si prepara il vuoto, poi vi si immette la miscela isolante calda e liquida.

Cogli isolanti tessili si fanno *nastri*, tele verniciate, sterligate, cerate, ecc. che sono molto usate per fasciare ed isolare gli avvolgimenti delle macchine ed apparecchi elettrici.

19.° *Isolanti composti vulcanizzati.* — Si trova in commercio una grande quantità di isolanti duri, pressati sotto forma di oggetti svariatissimi necessari nelle costruzioni elettriche: manici, manicotti, tubi, basi, imboccature, coperchi, calotte, rocchetti per avvolgimenti di fili, isolatori di forme svariate per uso di linee di trazione elettrica a sfera, a campana, a bastone, ecc. La composizione di questi isolanti è tenuta segreta dai costruttori, ma evidentemente essi sono il prodotto di miscele di materie inerti come segatura di legno finissima, cellulosa, amianto in polvere, polveri minerali ecc. agglomerate con vernici a base di gomme e resine, compresse a caldo e vulcanizzate sotto fortissime pressioni.

L'isolante composto più noto è l'*ebanite* o *vulcanite* ottenuta dal caoutchou mescolato a forti percentuali di zolfo ed a sostanze minerali. Gli oggetti di ebanite vengono stampati a freddo e poi vulcanizzati in autoclavi a 115°; ordinariamente è di color nero. L'ebanite non si presta per oggetti ad alta tensione industriali perchè si deforma col calore ed è fragile; si adopera invece per oggetti da laboratorio e da gabinetto di fisica. L'ebanite non si può adoperare dove si richiedono sforzi meccanici o dove vi è possibilità di riscaldamento

perchè si rammollisce a 86°, anzi rammollita in acqua bollente si può stampare in forme.

Più resistenti meccanicamente sono l'ambroina, la stabilite, la diamantite, il vulcanasbest, la vulcanite, l'okonite, gomma-ferro, asbestonite, ecc. Tutte queste sostanze però rammolliscono più o meno a temperature intorno a 100°.

20.° *Vernici isolanti.* — La vernice più comune è quella di gomma lacca sciolta in alcool assoluto. Un'altra vernice è quella formata con olio di lino cotto che dà una crosta più resistente, più elastica di quella della gomma lacca.

Molto note sono le vernici Sterling che sono a base di olio cotto e gomma copale sciolte in olii eterei. Vi sono qualità per essicamento rapido e qualità per essicamento lento ma più duraturo e resistente. Le vernici Sterling possono essere trasparenti, semitrasparenti e colorate in giallo o nero. Anche quelle trasparenti vengono generalmente mescolate a colori. Nelle grandi fabbriche di macchine elettriche, le matasse di avvolgimento vengono essicate col vuoto in autoclavi e poi impregnate di vernici dette *compound* a base di bitume, olii essicanti, bachelite, ozocherite, ecc.

19. Origine delle scariche atmosferiche e principio di costruzione degli scaricatori di linee. — E' provato che la condensazione del vapore acqueo sotto forma di nube avviene (specialmente nelle ore diurne estive in cui l'aria è molto ionizzata (par. 15) dai forti raggi solari) con un contemporaneo addensamento di elettroni e ioni negativi, per cui le nubi restano fortemente caricate di elettricità negativa. La presenza di queste nubi provoca per induzione alla superficie della terra una carica positiva sotto le nubi. Tra la nube temporalesca e la terra si forma un intenso campo elettrico con gradiente fortissimo, pari a parecchie migliaia di volt ogni metro di altezza.

Una linea formata da un filo conduttore qualsiasi teso parallelamente al suolo ed isolato da questo coi soliti isolatori di porcellana, si carica anch'essa per influenza positivamente sulla faccia rivolta alla nube e negativamente verso la terra. Ma stante l'imperfetto isolamento la carica negativa tende a neutralizzarsi coll'elettricità positiva della terra ed atmosfera, rimanendo sul filo soltanto la carica positiva. Tutto ciò si com-

pie adagio mano mano che si forma, o si avvicina la nube temporalesca.

Ma allo scattare di un fulmine fra nube e nube o peggio fra nube e terra, le loro cariche si neutralizzano; il potenziale della terra subisce variazioni istantanee forti; la carica elettrica positiva sulla linea tenuta fino allora in equilibrio dal potenziale alto della terra si sposta verso le estremità; tra terra e filo si formano differenze di potenziale che possono essere molto forti. Ecco perchè toccando dei fili, sia pure telefonici o telegrafici, si sentono durante temporali delle scosse che possono essere pericolosissime.

Ciò spiega come durante i temporali tutte le linee aeree (telegrafiche, telefoniche, di trasmissione d'energia, ecc.) rivelano delle *sovratensioni* verso la terra che danno poi origine non solo alle scosse, ma a scintille, perforazioni di isolanti delle macchine, abbruciamenti. (Vedi Fig. 22 - 23).

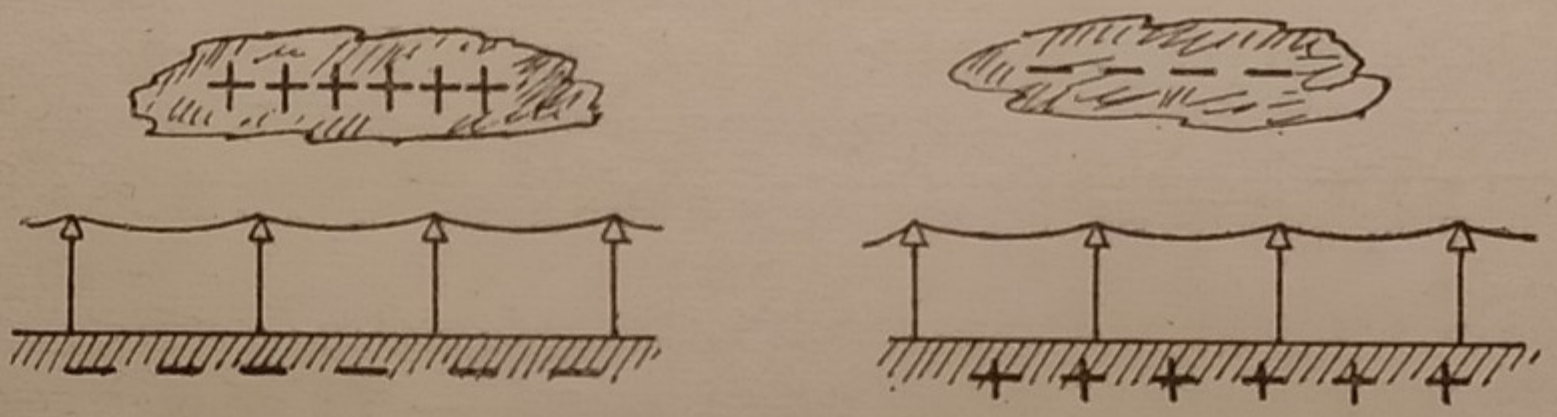


Fig. 22 - 23 - Polarità della terra nei temporali.

Queste variazioni di potenziale fra filo e terra sono estremamente brevi e nell'ordine di un milionesimo di secondo.

Fenomeni più complessi ma analoghi succedono se una lunga linea è influenzata per tratti da nubi cariche con potenziali diversi rispetto alla terra. (Fig. 24).

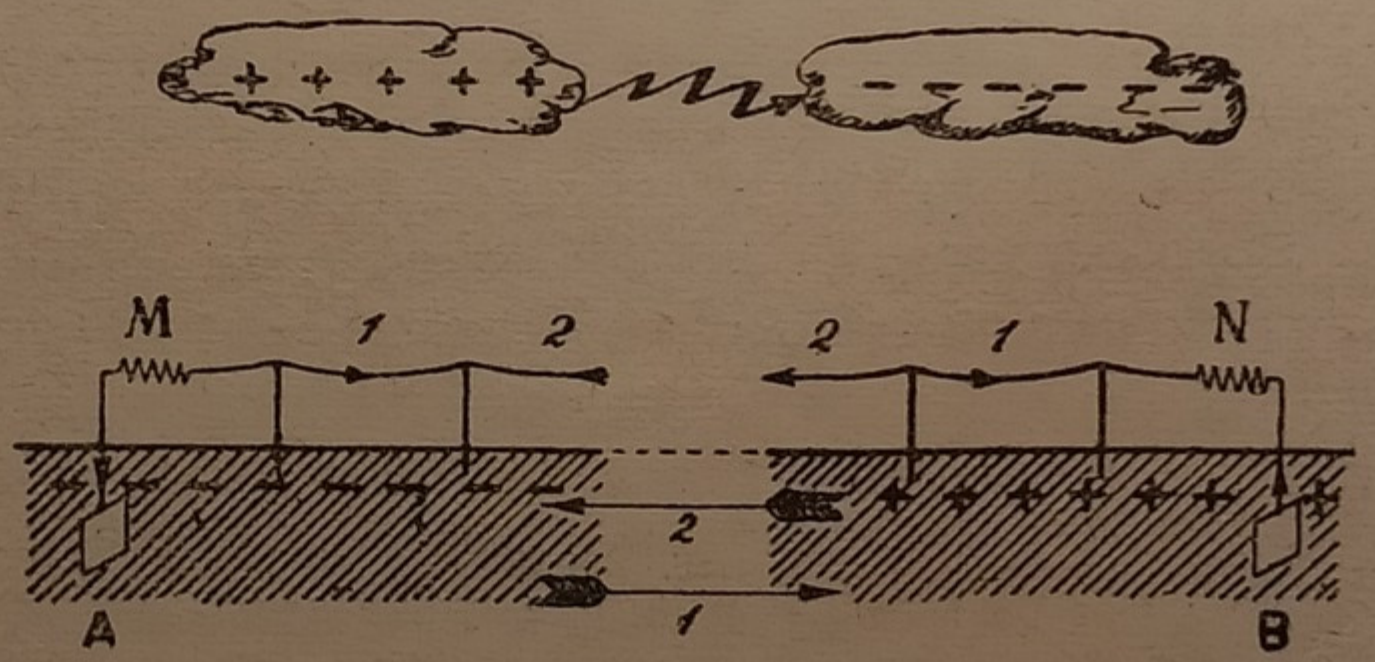


Fig. 24 - Linea influenzata da nubi di opposta polarità.

Scopo degli scaricatori delle linee è quello di aprire colla massima rapidità una via verso terra delle cariche elettriche e quello di attutire e distendere le onde di elettroni che si spostano con fronte ripida nei conduttori colla velocità della luce ossia 30 mila chilometri al 1".

Gli scaricatori delle linee di trasmissione d'energia nel mentre devono eliminare le scariche d'origine temporalesca, devono impedire che sfugga anche l'elettricità prodotta dalle macchine e che viene trasmessa.

I dispositivi immaginati per gli scopi sopradetti sono infiniti, ma quelli più comuni consistono nel creare degli interspazi d'aria piccoli fra i quali possa formarsi la scintilla di scarica verso terra. (Fig. 25).

Con altri tipi di scaricatori si mette a terra la linea direttamente mediante getti d'acqua, tubi di vetro pieni di acqua oppure mediante sostanze che lascino passare solo le scariche in un senso e non in senso contrario (scaricatori elettrolitici).

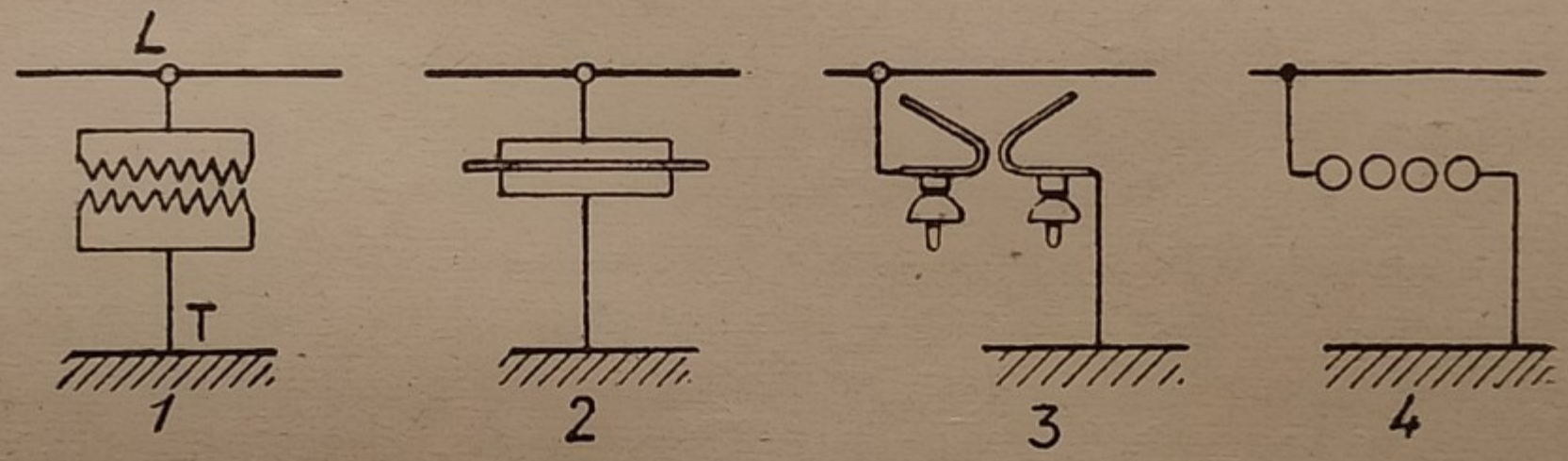


Fig. 25 - Tipi diversi di scaricatori
1. Scaricatori a pettini - 2. a fogli di mica - 3. a corni - 4. a rulli.

Altri hanno immaginato di mettere dei condensatori fra i fili e la terra per immagazzinare temporaneamente le cariche residue provocate nei temporali e abbassare la differenza potenziale.

Non è scopo di questo libro di internarsi nella revisione critica e minuta di tútti gli scaricatori applicati comunemente negli impianti telegrafici, telefonici e di trasmissione d'energia e pertanto rimandiamo i lettori ai testi speciali in materia. A noi basta l'aver indicato l'origine intima del fenomeno.

CAPITOLO II.

Elettrodinamica generale

20. Corrente elettrica. — L'elettrodinamica studia i fenomeni e le leggi dell'elettricità in movimento, mentre l'*elettrostatica* considera l'elettricità ferma e in equilibrio sui corpi. Studiando quest'ultimo campo abbiamo visto come le scariche elettriche hanno libertà di muoversi solo nei *corpi conduttori* e non sui *coibenti* od *isolanti*; quando queste scariche elettriche invece di star ferme circolano ininterrottamente nei conduttori formando un vero flusso di *elettroni*, allora si ha una corrente elettrica.

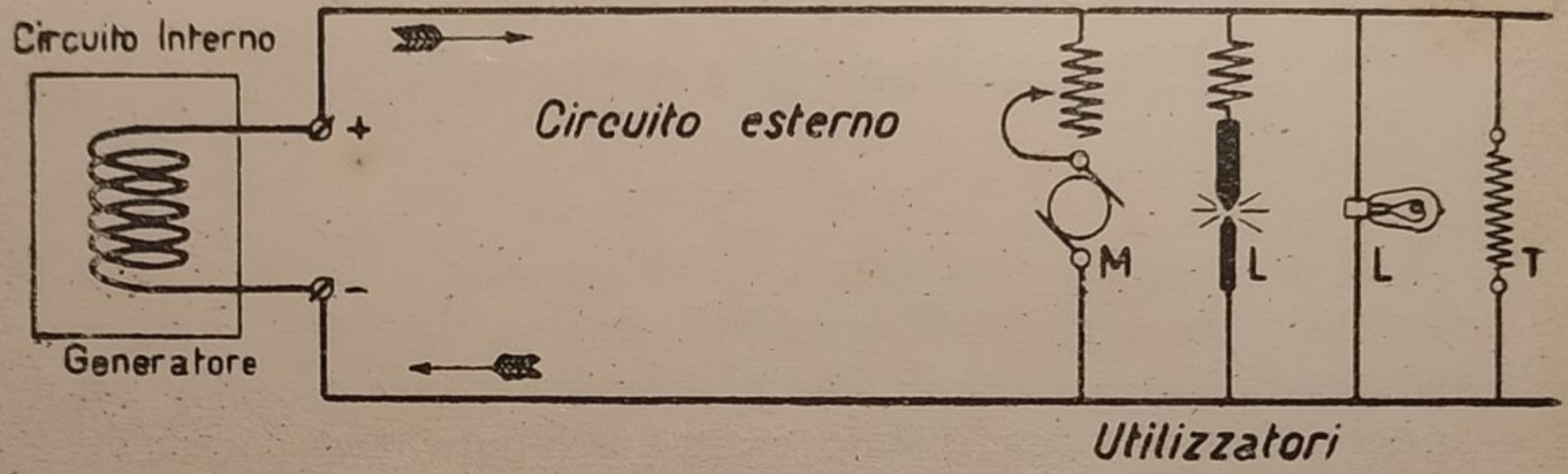
La corrente elettrica nei fili è paragonabile alla corrente di acqua o di gaz nei tubi, con questa differenza: mentre nel tubo l'acqua ha una velocità variabile e non ha nessuna azione sullo spazio circostante al tubo, la corrente elettrica è formata dal flusso circolante colla velocità costante della luce ossia di 300 mila chilometri al minuto secondo. Inoltre intorno a questo flusso lo spazio (anche se vi è il vuoto) resto modificato e in date circostanze si sviluppano delle forze elettrostatiche ed elettromagnetiche di attrazione o ripulsione sui corpi vicini ai conduttori.

21. Circuito elettrico. — Abbiam visto che si può ottenere dell'elettricità sui corpi, anche isolanti, per mezzo dello strofinio od approfittando del fenomeno della influenza elettrostatica. Ma i mezzi più impiegati per generare correnti elettriche sono le *pile*, le *pile termoelettriche*, le *dinamo* ecc. Questi apparecchi trasformano rispettivamente l'energia chimica, calorifica, meccanica in elettricità; essi creano ap-

punto un flusso di elettricità il quale partendo da un punto del generatore, ritorna ad un altro punto seguendo la via segnata dai *conduttori esterni*.

Il percorso che fa la corrente si dice *il circuito*.

Un circuito forma col generatore un ciclo chiuso; cioè la corrente segue la via segnata dal *circuito esterno*, partendo da *un polo* o morsetto del generatore ed arrivando ad un altro polo del medesimo; poi da questo passa al primo polo seguendo il *circuito interno*. (Fig. 26).



M. Motore — L Lampade — T Termoelemento

Fig. 26 - Circuito semplice interno ed esterno.

La *corrente elettrica continua* ha riscontro in idraulica alla corrente d'acqua messa in circolazione da una pompa a getto continuo (pompa centrifuga) in un tubo che partendo dalla bocca premente arriva alla bocca aspirante. (Fig. 27). E' la corrente generata dalle dinamo.

La corrente alternata è paragonabile invece al flusso alternativo di acqua che si formerebbe in un tubo congiungente le estremità di un cilindro nel quale si muova uno stantuffo. E' la corrente generata dalle macchine elettriche dette *alternatori*. (Fig. 28).

La terra si può considerare come un enorme conduttore che talvolta fa parte del circuito; così quando si tratta del circuito di tramvie o ferrovie elettriche, la corrente partendo da un polo della dinamo generatrice segue il filo della linea, passa per i motori delle vetture e ritorna all'altro polo della dinamo per mezzo delle rotaie e della terra.

Un circuito si dice *chiuso* quando non è interrotto ed il flusso elettrico può circolare; *aperto* quando vi è una interruzione che impedisce al flusso di passare.

22. Forza elettromotrice (f. e. m.) **e tensione o differenza di potenziale** (d. d. p.) — Ogni qualvolta in un tubo si forma una corrente d'acqua o d'altro fluido è segno che vi è una differenza di livello o di pressione fra le estremità del tubo; se non vi fosse nessun dislivello d'acqua, il fluido non si muoverebbe. La causa del movimento è quindi il detto dislivello o differenza di pressione.

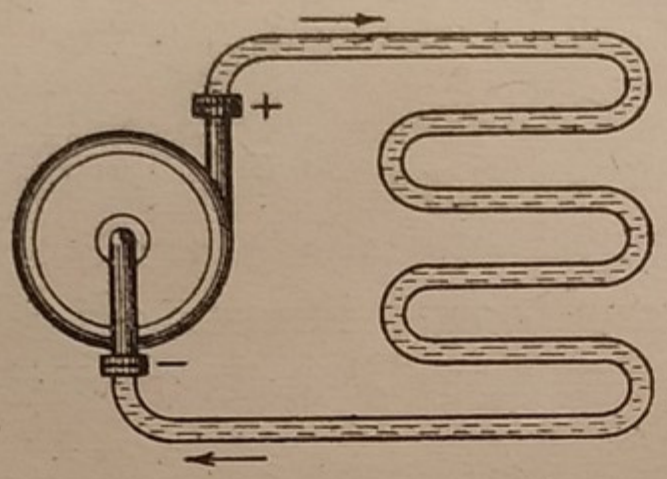


Fig. 27 - Immagine idraulica di una corrente continua.

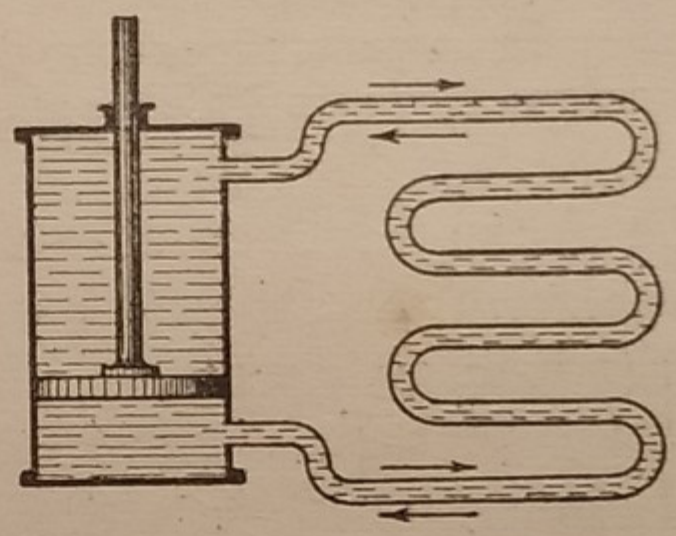


Fig. 28 - Immagine idraulica di una corrente alternata.

L'identico fatto succede nei conduttori elettrici; in essi l'elettricità è spinta a muoversi ed a formare una corrente perchè vi è un dislivello elettrico fra le estremità. Tale dislivello si dice in modo generico: *differenza di potenziale, tensione, voltaggio.* Si usa distinguere la d. d. p. col nome di *forza elettromotrice* (f. e. m.) quando è riferita a quella *attiva* che si crea ai morsetti delle pile, delle dinamo ecc. Questa d. d. p. non si deve confondere con quella *passiva* che si forma nei conduttori e che equivale nella idraulica alla perdita di pressione nei tubi. Di solito il circuito interno di un generatore (avvolgimento dell'indotto di una macchina elettrica) è sede contemporanea di una f. e. m. attiva e di una d. d. p. passiva; il dislivello elettrico alle estremità di questo circuito si chiama in modo generico tensione o differenza di potenziale; questo è uguale alla f. e. m. attiva meno la perdita di carico.

La f. e. m. è quindi la causa per cui si forma una corrente. Ai nostri sensi non risulta (come si può vedere col flusso d'acqua) la vera direzione della corrente elettrica ma però si è *convenzionalmente* stabilito di chiamare polo positivo quel punto di un generatore o circuito dove la pressione elettrica è più alta in confronto di altro polo o punto detto

negativo dove la pressione è più bassa. Come polo + si è scelto nelle pile quello che corrisponde al rame di una pila di Volta e — quello dello zinco. La corrente elettrica si intende sempre diretta da un polo + ad un polo — nel circuito esterno al generatore.

Abbiamo detto che la direzione della corrente dal + al — è convenzionale. Secondo le moderne idee e teorie sulla costituzione della elettricità, la corrente sarebbe un flusso reale di elettroni (carichi negativamente) respinti dal polo — ed attratti dal polo +.

La forza elettromotrice si misura in *volt* dal nome di Alessandro Volta. Il *volt* è quindi l'unità che serve a misurare la differenza di pressione elettrica così come i metri di salto e le atmosfere servono a misurare i dislivelli e le pressioni idrauliche.

Un volt corrisponde presso a poco alle f. e. m. fra i poli di una pila Daniell o di una pila italiana per telegrafi.

23. Intensità e densità della corrente. — Si dice *intensità* il flusso di corrente che passa in un conduttore al minuto secondo. Si dice anche *amperaggio*. L'intensità è paragonabile a ciò che si chiama in idraulica la portata in litri o in metri cubi al minuto secondo.

L'intensità di una corrente si esprime in *ampère*, nome derivato da quello del fisico Ampère che studiò per primo le azioni elettro magnetiche delle correnti elettriche.

In un conduttore percorso da una corrente l'intensità è la medesima in ogni punto anche se la sezione è diversa da punto a punto. In questo caso varia invece la *densità* della corrente nel conduttore ossia la intensità per ogni millimetro quadrato di sezione.

Per esempio la densità di corrente nei fili di rame di avvolgimento della macchine elettriche si tiene da 2 a 3 ampère per mmq. Pei fili di rame degli impianti interni si tiene normalmente da 4 a 5 Amp. per mmq. pei fili sottili, da 3 a 4 Amp. pei fili di grossezza media, da 2 a 3 per corde, da 1 a 2 per le sbarre di grande sezione.

24. Quantità di elettricità o di corrente. — La quantità di corrente è il complesso o totale della corrente che

passa in un circuito od è consumata da un apparecchio in *un tempo determinato*; essa si ottiene moltiplicando gli ampère per il tempo, supposto che in questo tempo la corrente si sia mantenuta costante. Se non fosse stata costante si prende la media. La quantità di corrente corrisponde in idraulica al *volume* espresso in litri o metri cubi.

La quantità di corrente si misura in *Coulomb*. Un *Coulomb equivale alla quantità di corrente di un ampère in un minuto secondo;* si dice perciò anche ampère-secondo.

Come altra unità pratica della quantità di corrente si impiega l'*ampère-ora;* un *ampère-ora* equivale a 3600 coulomb.

ESEMPIO 1. — Un apparecchio elettrico consuma 20 A. Quanti « Coulomb » assorbirà in 3 ore?

R. — Avremo: $20 \times 3 \times 3600 = 216000$ coulomb.

2. — L'accumulatore di un automobile ha la capacità di 30 Amp-ora ma per la carica occorre il 30 per cento di più. Quale sarà l'intensità della corrente per carica in 4 ore?

R. — La quantità di corrente da fornire sarà $30 + 30\% = 39$ Amp-ora quindi la carica richiederà in 4 ore una corrente continua di:

$$39 : 4 = 9{,}75 \text{ amp.}$$

25. Resistenza elettrica e sue leggi. — La corrente elettrica trova una resistenza nel passare lungo i conduttori come se questi esercitassero un *attrito*. Si è trovato che questo attrito è diverso a seconda del metallo costituente il conduttore ed è proporzionale alla sezione. Questo attrito produce calore nei conduttori.

La resistenza elettrica si misura in *ohm*. Un ohm è la resistenza offerta da una colonna di mercurio in un tubo di vetro lungo 106 cent. dalla sezione di un millimetro quadrato, mantenuto alla temperatura del ghiaccio fondente.

Si chiama *resistenza specifica* o *resistività* di un corpo la resistenza in ohm di un conduttore del detto corpo, avente un millimetro quadrato di sezione e un metro di lunghezza. Talvolta si riferisce la resistività a quella di un conduttore lungo un centimetro e della sezione di un centimetro quadrato; in questo caso l'espressione in ohm riesce, pei comuni metalli, molto piccola e si usa perciò di esprimere tale resistività in *microohm* (milionesimi di ohm). Per tradurre la

resistività espressa in microohm per cm. cubo in ohm per metro o per mmq. si divide la prima per 100.

Viceversa moltiplicando per 100 la resistività in ohm per *m e per mmq* si ottiene la resistività in microohm per *cm.* di lunghezza e un cm. quadrato di sezione.

La tabella 4 dà la resistività dei principali metalli e leghe alla temperatura di 15° C.

Il simbolo normalmente impiegato per esprimere la resistività è la lettera greca ρ.

Si dice *conduttanza* l'inverso della resistenza ossia uguale a 1: R; essa si esprime in *mho.*

Si dice *conduttività* il numero inverso della resistività ossia $\frac{1}{\rho}$.

Ciò premesso la legge della resistenza dei conduttori a sezione costante (fili, sbarre, corde ecc.) è:

La resistenza di un conduttore è proporzionale alla sua lunghezza ed inversamente proporzionale alla sua sezione.

Se R esprime la resistenza in ohm di un conduttore, l la sua lunghezza in m.; s la sua sezione in mmq; ρ la resistività del metallo dal conduttore espressa per un m. di lunghezza e per un *mmq.* di sezione si ha:

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

dalla quale formola si cavano le seguenti:

$$l = \frac{R\,s}{\rho} \quad ; \quad s = \rho \frac{l}{R} \quad ; \quad \rho = \frac{R\,s}{l}$$

colle quali dati 3 fattori si trova il quarto.

ESEMPI. — 1.° Calcolare la resistenza di un filo di rame lungo 6 km. e della grossezza di 2 mm.; la resistività del rame è 0,017.

R. Bisogna esprimere la lunghezza in metri e trovare la sezione in mmq. del filo. La lunghezza è 6000 m. e la sezione 3,14 mmq. Applicando la formola 1.a si ha:

$$R = 0{,}017 \frac{6000}{3{,}14} = 32{,}1 \text{ ohm}$$

2.° Quale lunghezza bisogna dare a un filo di ferro di 3 mm. di diametro per formare 30 ohm. La resistività del ferro si calcola 0,14.

R. Mettendo i numeri al posto delle lettere e sapendosi che il filo di 3 mm. ha la sezione di 7,06 mmq. si ha:

$$l = \frac{30 \times 7{,}06}{0{,}14} = 1514 \text{ metri}$$

3.° Calcolare la sezione di un filo d'alluminio lungo 500 m. e della resistenza di 15 ohm. La resistività dell'alluminio è 0,03.

$$s = \frac{0{,}03 \times 500}{15} = 1{,}00 \text{ mmq}$$

La legge di Ohm è esatta per i metalli e per molte altre sostanze non decomponibili dalla corrente. Nei sali metallici sia sciolti, sia allo stato di fusione il fenomeno della conduzione si cambia radicalmente perchè entra in giuoco il fenomeno dell'elettrolisi. La corrente in questo caso non è più un semplice flusso di elettroni scorrenti negli spazi interatomici, ma diventa l'effetto di un trasporto di ioni, cioè di un movimento in doppio senso di atomi, molecole portanti cariche opposte.

Talvolta, se si tratta di far passare la corrente da un corpo ad un altro la resistenza varia notevolmente a seconda della direzione. Per esempio mettendo un disco di sottosolfuro di rame tra uno di piombo e uno di alluminio la resistenza ohmica è piccolissima nel senso piombo ossido e grande nel senso opposto. Lo stesso succede fra rame ossidulato e rame metallico, tra alluminio ossidato e una soluzione, tra ossido di piombo e metallo ecc. Gli archi voltaici di vapori metallici (mercurio) sono con corrente unidirezionale. Si approfitta di queste proprietà per costruire raddrizzatori di corrente alternata in continua. Il selenio ed in minor effetto molti altri metalli o cristalli variano di resistenza a seconda che sono più o meno illuminati o soggetti a raggi X.

26. Influenza della temperatura sulla resistenza dei conduttori. — Se i conduttori sono formati da metalli semplici la resistenza aumenta colla temperatura; invece se i conduttori sono di carbone (filamento delle vecchie lampade ad incandescenza, carboni per forni elettrici, ecc.) o di soluzioni saline od acide, la resistenza diminuisce coll'aumentare della temperatura. Vi sono leghe (costantana ecc.) nei quali la resistività è costante o quasi costante ad ogni temperatura.

Si dice *coefficiente di temperatura* di un metallo l'aumento della resistenza per ogni grado centigrado e per ohm ovverossia il coefficiente per cui bisogna moltiplicare una resistenza per avere l'incremento o il decremento di resistenza corrispondente ad 1 grado cent. I coefficienti di temperatura

sono espressi nella seconda colonna della tabella 4. Esso si indica generalmente colla lettera α Il coefficiente di temperatura non è costante a qualunque temperatura ma varia. La variazione è piccola entro i limiti delle ordinarie temperature ossia da 0 a 100°.

Se Rt esprime la resistenza di un conduttore a *t gradi* centigradi; Rt_1 esprime la resistenza del medesimo a t_1 gradi (maggiore di t) si ha approssimativamente:

$$Rt_1 = Rt\ (1 + \alpha\ (t_1 - t)\ )$$

Il coefficiente α varia pei metalli semplici comuni fra 0,0035 e 0,0042, nei limiti di temperatura fra 0 e 100° circa.

Bastano impurità anche piccolissime per far diminuire di molto il coefficiente di temperatura.

E' stato provato che sottoponendo i metalli a bassissime temperature vicine allo zero assoluto (—263°) la resistenza elettrica decresce rapidamente fino ad annullarsi. Provocando in un circuito chiuso a questa temperatura una corrente, essa tende a persistere per inerzia senza bisogno che una f. e. m. la sostenti (fenomeno Kamerling Omnes). Così pure si deduce che, ove si potesse mantenere i conduttori a così basse temperature si potrebbero trasmettere correnti enormi con sottilissimi fili.

ESEMPIO. — Un avvolgimento di filo di rame ha una resistenza di 10 ohm alla temperatura di 15°. Quale sarà la sua resistenza a 85 gradi C.

R. Sostituendo i numeri ai simboli si ha:

$$Rt = 10\ (1 + 0{,}004\ (85 - 15)\ ) = 12{,}8 \text{ ohm}$$

Dalla formola sopra indicata si cava:

$$t_1 - t = \frac{Rt_1 - Rt}{\alpha\ Rt}$$

che serve a calcolare per mezzo di misure di resistenza l'aumento di temperatura di un conduttore.

ESEMPIO. — Il circuito primario di un trasformatore ha una resistenza di 1,8 ohm a freddo ed a 15°; dopo aver funzionato a

pieno carico il trasformatore per parecchie ore, la resistenza è salita a caldo a 2 ohm. Quale sarà stato l'aumento di temperatura?

R. L'aumento di temperatura sarà:

$$t, - .t = \frac{2 - 1{,}8}{0{,}004 \times 1{,}8} = 27^0$$

Il coefficiente α in taluni libri si esprime come una *percentuale di aumento* di resistenza. Applicando questa percentuale l'aumento di resistenza trovato colla formola deve essere diviso per 100.

TABELLA N. 4 — Resistività e coefficenti di temperatura.

CONDUTTORI	ρ Resistività per m. e per mmq. a 15^0	α Coefficente di temperatura
Alluminio (ricotto)	0,028-003	0,0037-0,0041
Argento (ricotto)	0,016-0,017	0,0036
Ferro trafilato	0,12-0,14	0,0045
Acciaio		
99 % di ferro	0,15	0,0045
99,5 % di ferro	0,12	
99,9 % di ferro	0,10	
Mercurio	0,95	0,00087
Nichel (ricotto)	0,124-0,11	0,0037
Oro (ricotto)	0,021	0,0036
Rame Elettrolitico comune	0,017-0,0175	0,004
Zinco	0,06	0,0039-0,0043
Stagno	0,11-0,13	0,0045
Platino	0,094	0,0024
Piombo pressato	0,20	0,0037
Bronzo d'alluminio (5 — 10 % Al)	0,13-0,29	0,001
Ottone in filo (30 % di Zn)	0,07-0,08	0,0015
Grafite e carbone di storta	13 a 100	0,00008
Platino-rodio (10 % di Rh)	0,20	0,001-0,0017
Manganina (84 Cu — 12 Mn — 4 Ni)	0,41-0,46	0,00001
Costantana (Cu + Ni)	0,49-0,47	0,00003
Nichelina I	0,41-0,43	0,00002
Cruppina (Fe + Ni)	0,85-0,86	0,00007
Argentana (Cu + Ni + Zn)	0,36-0,38	—0,00008
Nicron (Cromo nichel 30 % di Ni)	0,95-1,00	0,00044
Kromore (Cromonichel al 15 % di Ni)	0,94	0;0003
Nichel acciaio	0,87	0,0007
Carboni Comuni per forni elettrici	31-35	—
Carboni grafitici Acheson	8,2	—
Tungsteno o wolfram	0,05	0,00051

27. **Legge di Ohm.** — Consideriamo un generatore G di elettricità i cui poli A e B sono chiusi da un circuito di filo. (Fig. 29).

Si stabilirà una corrente da A verso B; ma questa corrente troverà una resistenza ossia un attrito e quindi la d. d. p. rispetto a B andrà diminuendo da A verso B. Il fenomeno è paragonabile a quello che si ha in un tubo nel quale corre dell'acqua fornita da un serbatoio a livello costante: la pressione andrà diminuendo nel senso della direzione della corrente d'acqua.

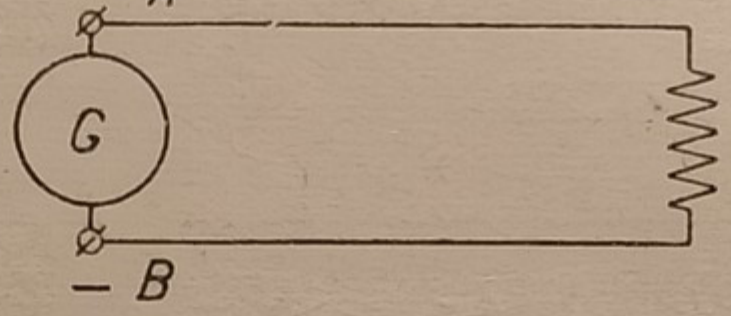


Fig. 29 - Circuito esterno a corrente continua.

Ciò si può dimostrare innestando in un tubo orizzontale dei *tubi piezometrici* indicanti il livello. (Fig. 30). Si verifica che durante la circolazione dell'acqua il livello nei singoli tubi si dispone secondo una linea inclinata. Il dislivello H fra i punti estremi si dice *perdita di carico.*

Trattandosi di conduttori, la differenza di pressione elettrica fra i punti A e B della fig. 29 si dice *differenza di potenziale* od anche *caduta di tensione. Essa è eguale e contraria alla forza elettromotrice* del generatore e si misura in volt.

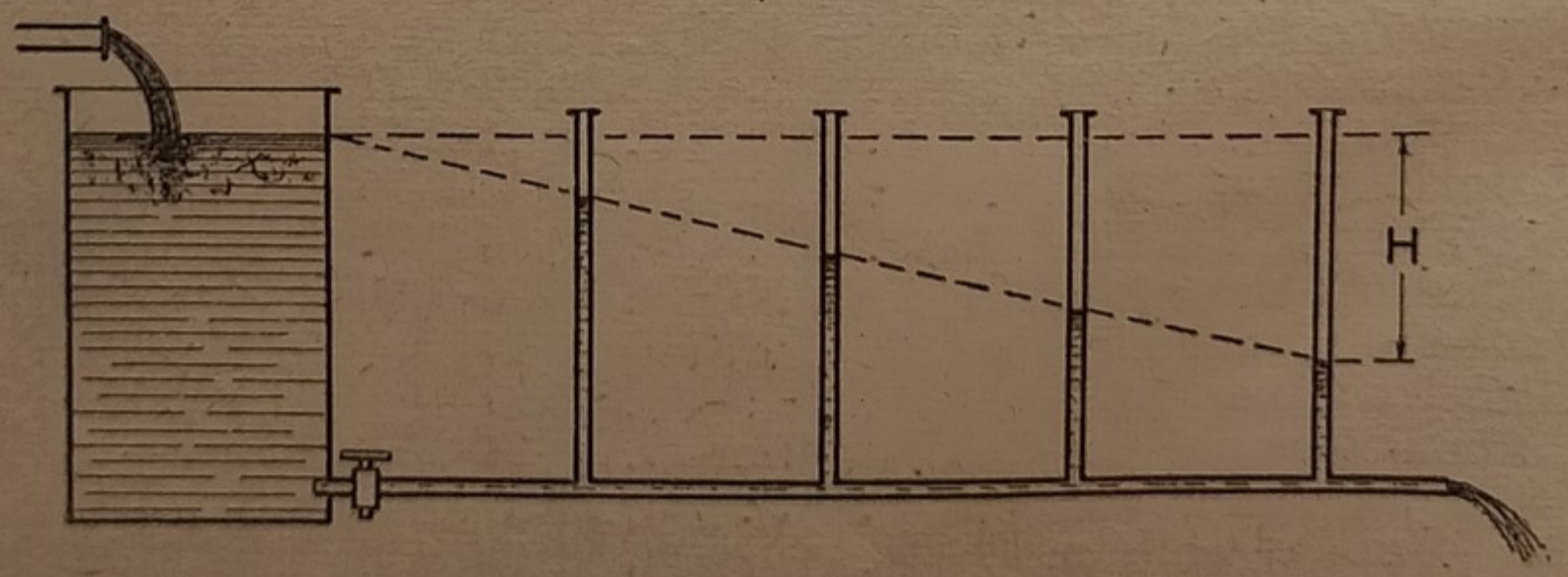


Fig. 30 - Caduta di pressione in un tubo d'acqua (H).

La legge di Ohm è la seguente:

La differenza di potenziale fra due punti di un conduttore percorso da corrente è proporzionale al prodotto della intensità per la resistenza.

Chiamando E la differenza di potenziale in volt, R la resistenza in ohm del conduttore, I l'intensità in ampère si ha:

$$E = RI$$

dalla quale si cava:

$$I = \frac{E}{R} \text{ ed anche } R = \frac{E}{I}$$

La seconda formola dice: l'intensità in un conduttore è proporzionale alla differenza di potenziale (o forza elettromotrice) ed inversamente proporzionale alla resistenza.

Si può quindi far variare la intensità in un conduttore variando la f. e. m. Oppure tenendo fissa la f. e. m. si può variare l'intensità variando R.

La legge di Ohm vale solo per i conduttori considerati a sè per l'attrito che offrono alla corrente; ma talvolta sono sede essi medesimi di vere f. e. m. che si creano in essi per influenze magnetiche, elettrostatiche, chimiche. Tale è il caso dei circuiti interni delle pile, degli apparecchi di elettrolisi, delle dinamo, ecc. In detti casi la tensione totale del circuito è uguale alla somma algebrica delle f. e. m. agenti sul circuito e delle cadute di tensione dovute alla resistenza ohmica del medesimo circuito. Bisogna quindi tener conto del segno delle f. e. m. agenti, prendendo come positive quelle che generano energia nel circuito, negative quelle che, come la caduta di tensione, rappresentano dissipazione di energia.

Perciò dato un circuito completamente chiuso formato da diverse resistenze e da diverse f. e. m. in serie fra loro, la somma di tutte le f. e. m. prese col segno + e delle cadute di tensione prese col segno — è zero, ossia la somma delle f. e. m. positive è uguale alla somma delle f. e. m. negative. Le f. e. m. negative si dicono anche *forze contro elettromotrici.*

La corrente brevissima di carica dei condensatori elettrostatici non è conseguenza della legge di Ohm perchè l'isolante interposto ha una resistenza quasi infinita, perciò dovreb-

be essere I = zero. Detta corrente non è quindi di *conduzione* ma di *spostamento* locale degli elettroni nell'isolante e il di cui meccanismo intimo non è ancora conosciuto. Essa rappresenta (in unione alla tensione fra le armature l'energia immagazzinata dal campo elettrico. (Vedi parag. 85).

1.° Qual'è la caduta di tensione in un filo di una linea di 0,5 ohm che trasmette 20 Ampèr?

R. Per la legge di Ohm avremo:

$$E = 0{,}5 \times 20 = 10 \text{ Volt}$$

2.° Quale sarà l'intensità di corrente in un filo di argentana lungo 20 m., del diametro di 1 mm., applicando fra gli estremi una f. e. m. di 50 V.?

R. Troviamo prima la resistenza del conduttore, osservando che la resistenza specifica dell'argentana è 0,38 e che la sezione del filo di 1 mm. è 0,78 mmq. (paragrafo 25):

$$R = \rho \frac{l}{s} = 0{,}38 \frac{20}{0{,}78} = 9{,}73 \text{ ohm}$$

Applicando la seconda delle formule derivate dalla legge di Ohm si ha:

$$I = \frac{50}{9{,}73} = 5{,}13 \text{ amp.}$$

3.° Qual'è la resistenza a caldo di una lampadina elettrica che alla tensione di 120 V. consuma 0,5 Amp.?

Per la 3.a formola dalla legge di Ohm:

$$R = \frac{120}{0{,}5} = 240 \text{ ohm}$$

26. Applicazione della legge di Ohm al calcolo delle linee a due fili. — Generalmente le linee elettriche più semplici per trasmissione di energia, per illuminazione, per telefoni, segnalazioni ecc. sono formate da due fili uguali uno di andata e l'altro di ritorno della corrente. (Fig. 31).

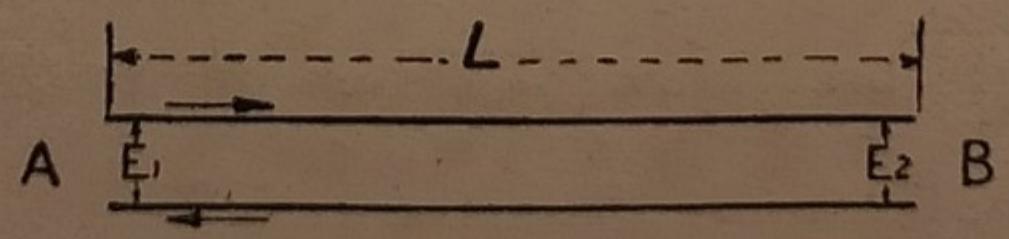


Fig. 31 - Circuito a due fili di andata e ritorno.

Supponiamo che in A. sia l'origine e in B l'estremità della linea dove vi è l'apparecchio utilizzatore dell'energia. Sia E_1 la f. e. m. all'origine e E_2 quella alla fine. Sia h la caduta di tensione in un filo.

Allora la caduta o perdita totale di tensione tra l'andata e il ritorno è data da:

$$E_1 - E_2 = 2\,h$$

Cioè i volt complessivi assorbiti da una linea a due fili, tra andata e ritorno, sono uguali alla differenza delle tensioni esistenti alla estremità della linea.

Su questi concetti si basano le formole della calcolazione delle linee a due fili: data la *lunghezza semplice* L di una linea in metri, l'intensità I in ampère, la perdita in volt $E = E_1 - E_2$ trovare la sezione s di ciascun filo in mmq. Di solito la perdita $E_1 - E_2$ viene assegnata da chi deve costrurre la linea con una *percentuale* p fra il 5 e il 10 per cento della tensione fra i due fili. Ossia la perdita complessiva nei due fili $E = E_1 - E_2$ si fa fra 0,05 e 0,10 di E_1.

Consideriamo ora le due formole (legge di Ohm e legge della resistenza dei conduttori del paragrafo 25):

$$E = RI \qquad R = \rho \frac{l}{s} \text{ in cui } l = 2\,L$$

Eliminando R e cavando s si ottiene:

$$s = \frac{\rho\ 2\ LI}{E} \text{ in cui } E = p\ E_1 \qquad (1)$$

Da questa formola si deduce quella che esprime la caduta o perdita di tensione nelle linee a due fili:

$$E = \frac{2\,\rho\,L\,I}{s} = \text{perdita reale in volt} \qquad (2)$$

$$p = \frac{2\,\rho\,L\,I}{s\ E_1} = \text{perdita percentuale} \qquad (3)$$

Queste formole valgono esattamente per la corrente continua. Per le linee a corrente alternata servono abbastanza bene se si tratta di lunghezze limitate a pochi chilometri, pochi ampère — fino a un centinaio —. Ma per linee con grandi amperaggi di molti chilometri allora entrano in giuoco altri fenomeni che possono alterare sensibilmente i risultati.

ESEMPI. — 1.° Un opificio deve essere collegato ad una dinamo avente la tensione di 200 volt, con una linea a due fili lunga 300 metri. Il consumo di corrente è previsto di 30 ampère. La resistenza specifica del rame è di 0,017; alla linea si assegna la perdita del 7% (ossia 0,07). Trovare la sezione di ciascun filo.

R. Applicando la formola (1) si ha:

$$s = \frac{0{,}017 \times 2 \times 300 \times 30}{0{,}07 \times 200} = 21{,}8 \text{ mmq}$$

2.° Una linea a due fili lunga 5 chilometri (5000 m.) trasmette 3 ampère colla tensione iniziale fra i fili di 500 volt. I fili hanno il diametro di 4 mm. e sono formati di rame elettrolitico commerciale colla resistività di 0,018 per m. e per mmq. Qual'è la perdita in volt: quale la perdita percentuale; quale la tensione finale?

R. Applicando la formola (2) e sapendo che la sezione del filo di 4 mm. è di 12,56 mmq. si ha:

$$E = \frac{\rho\, 2\, L\, I}{s} = \frac{0{,}018 \times 2 \times 5000 \times 3}{12.56} = 42 \text{ volt}$$

La perdita percentuale si otterrà colla proporzione:

$$\frac{42}{500} = \frac{X}{100} \text{ da cui } X = 8{,}4\,\% \text{ ossia } = 0{,}084$$

La tensione finale sarà $500 + 42 = 542$ volt.

3.° Una linea a due fili alimenta un motore il quale assorbe 200 V. mentre all'origine della linea, la dinamo sviluppa una f. e. m. di 220 V. La corrente circolante è di 20 Amp. Si domanda quale è la caduta di tensione (o perdita) totale ed in ciascun filo; e quale è la resistenza di ogni filo.

R. La caduta di tensione totale è $220 - 200 = 20$ Volt ossia circa il 10%.

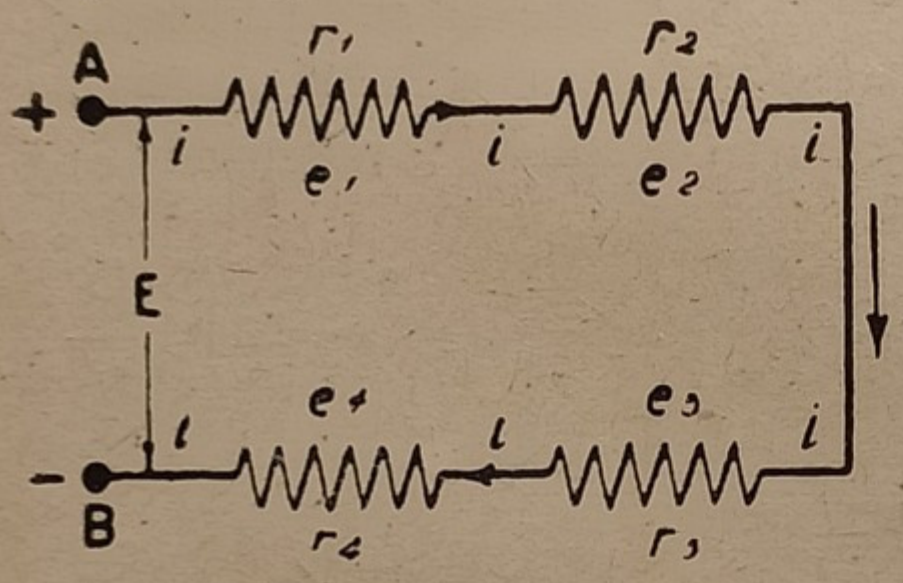
In ciascun filo si ha una caduta della metà ossia di 10 Volt.

Per la legge di Ohm (3.a formola) si ha:

$$R = \frac{E}{I} = \frac{10}{20} = 0{,}5 \text{ ohm per ogni filo.}$$

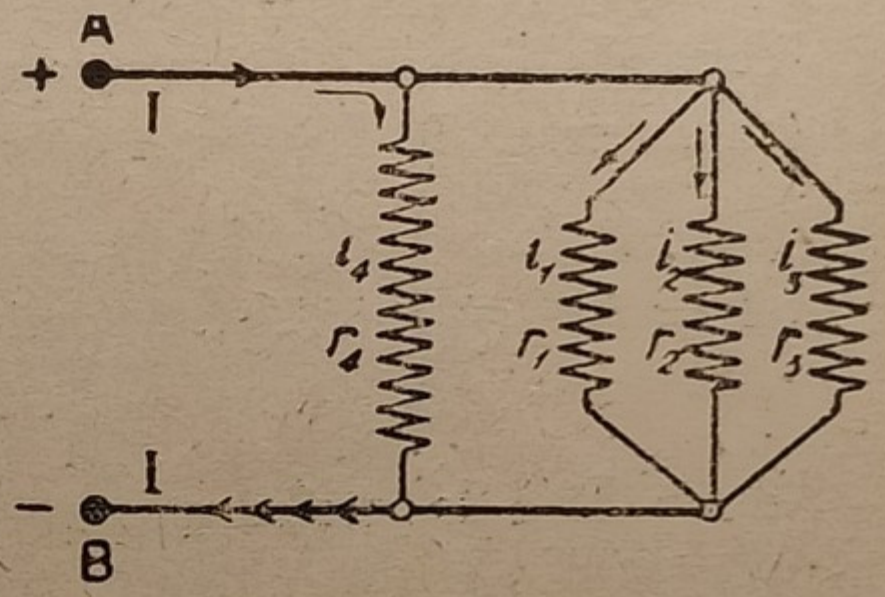
Dalla seconda formola della legge di Ohm si deduce che: se la resistenza R fosse zero o quasi si formerebbe una corrente infinitamente grande. Il caso succede nella pratica quando un conduttore di resistenza estremamente piccola si intromette fra due conduttori tra i quali vi è una notevole differenza di potenziale. Si ha allora ciò che si dice *corto circuito*. I corti circuiti sono pericolosi e nocivi per i forti richiami di corrente cui danno luogo. Le correnti di corto circuito riscaldano e talvolta fanno abbruciare i fili di avvolgimento interni alle macchine generatrici di energia.

29. Raggruppamento delle resistenze. — Più resistenze possono inserirsi nei circuiti in due modi:



$$E = e_1 + e_2 + e_3 + e_4$$
$$R = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$$

Fig. 32 - Resistenze in serie.



$$I = i_1 + i_2 + i_3 + i_4$$
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}$$

Fig. 33 - Resistenze in derivazione.

1.° *Resistenze in serie* (fig 32). Le resistenze r_1 r_2 r_3 *sono accoppiate l'una dopo l'altra.*

2.° *Resistenze in derivazione od in parallelo* (fig. 33). Le resistenze r_1 r_2 r_3 ecc. sono accoppiate tutte per un capo ad un conduttore A e per l'altro capo ad un conduttore B.

Col primo raggruppamento la resistenza complessiva R fra i due punti A e B della serie è la somma delle singole resistenze r_1 r_2 r_3 ecc.

Chiamando *i* l'intensità uniforme nel circuito delle resistenze in serie, le cadute di tensione ai capi delle singole resistenze saranno per la legge di Ohm:

$$e_1 = r_1 i \qquad e_2 = r_2 i \qquad e_3 = r_3 i \text{ ecc.}$$

La caduta complessiva fra gli estremi A e B sarà:

$$E = e_1 + e_2 + e_3 \text{ ecc.} \qquad \text{ossia} \qquad E = i\,(r_1 + r_2 + r_3 \ldots .)$$

Si deduce che *le singole cadute di tensione si suddividono in proporzione delle resistenze.*

Col secondo raggruppamento. Se E è la differenza di potenziale fra i punti A e B, i_1 i_2 i_3 le correnti nelle singole derivazioni si ha:

$$E = r_1 i_1 = r_2 i_2 = r_3 i_3 \text{ oppure } i_1 = \frac{E}{r_1} \qquad i_2 = \frac{E}{r_2} \qquad i_3 = \frac{E}{r_3}$$

Da cui si deduce che le correnti derivate si suddividono secondo intensità inversamente proporzionali alle rispettive resistenze. Se I è la intensità totale in A. e in B. avremo:

$$I = i_1 + i_2 + i_3 \ldots . \qquad \text{ossia } I = E\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \ldots .\right) = \frac{E}{R}$$

dove R è la resistenza complessiva cioè:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \ldots . \qquad \text{ossia } R = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \ldots .}$$

La prima di queste formole esprime la legge che per più resistenze in derivazione la *conduttanza totale è uguale alla somma delle conduttanze derivate.*

Se le resistenze r_1 r_2 r_3 ecc. che sono inserite in derivazione sono uguali fra loro e di valore r indicando con n il numero delle derivazioni si ha:

$$R = \frac{r}{n}$$

e quindi aumentando le derivazioni la resistenza complessiva diminuisce.

Inserendo ad esempio delle lampadine tra due fili la resistenza complessiva si abbassa e quindi si eleva la corrente totale. Se invece si mettessero le lampadine in serie fra loro la resistenza complessiva andrebbe aumentando.

ESEMPIO. 1.° — Dai morsetti di una dinamo a 150 Volt (Fig. 35) si stacca una linea a due fili di rame di 2 mm. di diametro, lunghi 200 m. e fra i quali sono inserite due lampade ad arco in serie con una resistenza che serve a regolare la corrente nel circuito in modo che abbia a mantenersi costantemente di 8 amp. Le lampade consumano ciascuna 40 V. e 8 Amp.: Quanti ohm deve avere la resistenza regolatrice R?

R. Si osserva anzitutto che la resistenza dei due fili di linea, quella delle lampade ad arco e la resistenza regolatrice R sono in serie. Calcoliamo il loro valore:

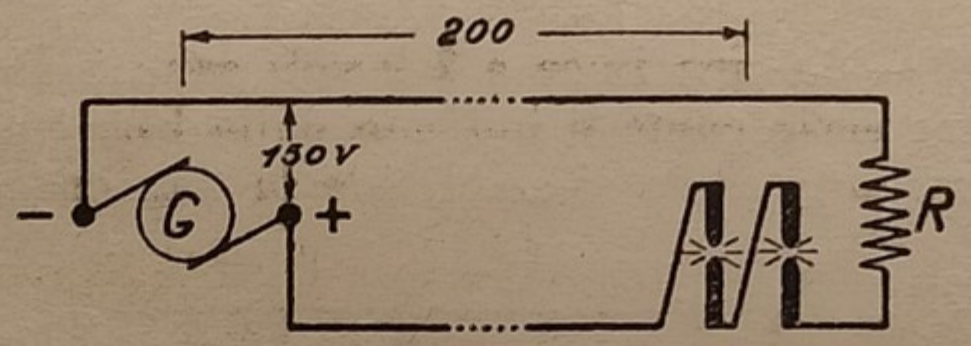


Fig. 35 - Linea con due archi in serie.

a) il filo di rame è lungo 400 mt. fra andata e ritorno ed avendo il filo di 2 mm. di diametro una sezione di 3,14 mmq. la resistenza dei due conduttori sarà:

$$R_1 = 0{,}017 \frac{400}{3{,}14} = 2{,}16 \text{ ohm}$$

b) La resistenza di ciascuna lampada ad arco si desume dalla terza formola derivata dalla legge di Ohm:

$$R_2 = \frac{E}{I} = \frac{40}{8} = 5 \text{ ohm}$$

c) La resistenza complessiva del circuito risulta dalla stessa formola osservando che gli ampère passanti sono 8 e che la f. e. m. è di 150 V.:

$$\text{Resistenza totale} = \frac{150}{8} = 18{,}75 \text{ ohm}$$

d) Chiamando R la resistenza regolatrice avremo:

$$18{,}75 = 2{,}16 + 5 \times 2 + R$$

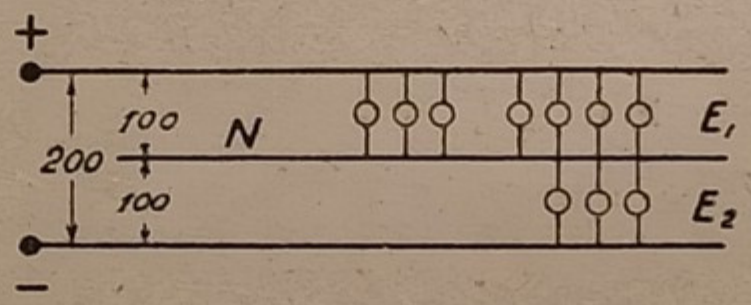
da cui $R = 6.59$.

ESEMPIO 2.° — In derivazione fra due conduttori vi sono delle resistenze che hanno il valore di 0,5. 1,00. 0,8. 2 ohm. Qual'è la resistenza totale?

R. La resistenza totale complessiva sarà espressa dalla formola generale sulle resistenze in derivazione:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{0{,}5} + \frac{1}{1} + \frac{1}{0{,}8} + \frac{1}{2}} = 0{,}21$$

ESEMPIO 3.° — In una linea a 200 volt sono inserite delle lampade da 100 volt in due serie come è indicato dalla Fig. 36 cioè col « sistema a tre fili ». Si domanda come si suddivide la tensione delle lampade nei



due gruppi se il sistema non è equilibrato cioè se i due gruppi l'uno dalla parte del polo + e l'altro dalla parte del polo — non sono uguali. Si ammette che nel primo gruppo vi sono N_1 lampade e nel secondo N_2 lampade della stessa potenza luminosa.

R. Essendo r la resistenza di una lampada, la resistenza totale del gruppo + sarà r/N_1 e quella del gruppo — r/N_2. Se I è la intensità della corrente, per la legge di Ohm avremo:

$$E_1 = \frac{r}{N_1} I \quad \text{e} \quad E_2 = \frac{r}{N_2} I$$

da cui si cava:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

cioè le f. e. m. dei due gruppi di lampade si suddividono in ragione inversa del loro numero. Chiamando E la tensione totale fra i due fili estremi avremo $E = E_1 + E_2$.

Da questa eguaglianza e dalle precedenti si cava:

$$E_1 = E \frac{N_2}{N_1 + N_2} \qquad E_2 = E \frac{N_1}{N_1 + N_2}$$

Se per esempio sul polo positivo si hanno 30 lampade e sul negativo 20 lampade la tensione di 200 V. si suddivide:

$$E_1 = 200 \frac{20}{50} = 80 \text{ Volt} \qquad E_2 = 200 \frac{30}{50} = 120 \text{ Volt}$$

e per conseguenza le lampade del primo gruppo daranno una luce bassa e rossastra; quelle del secondo gruppo una luce vivissima.

ESEMPIO. — 4.° Calcolare la tensione totale assorbita e la corrente in ciascun ramo di tre resistenze in parallelo rispettivamente di 3, 4, 5 ohm; supposto che l'intensità totale sia di 50 Amp.

R. La resistenza totale sarà per le formole generali al par. 28.

$$R = \frac{1}{\frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}} = \frac{1}{\frac{47}{60}} = 1{,}277 \text{ ohm}$$

La caduta di tensione sarà come dalla Legge di Ohm:

$$E = R\,I \quad \text{ossia: } 50 \times 1{,}277 = 63{,}85 \text{ Volt}$$

La corrente in ogni ramo sarà per la stessa legge:

$$I = \frac{E}{R} \quad \text{ossia: } \frac{63{,}85}{3} = 21{,}28 \text{ nel } 1^0 \text{ ramo}$$

$$\frac{63{,}85}{4} = 15{,}96 \text{ nel } 2^0 \text{ ramo}$$

$$\frac{63{,}85}{5} = 12{,}77 \text{ nel } 3^0 \text{ ramo}$$

Esercizi da risolvere.

1.° Misurando con un voltmetro e un amperometro la tensione e la corrente alle estremità di un circuito a due fili (andata e ritorno) tra i quali sono inserite in parallelo 30 lampade ad incandescenza uguali si trova che a 100 volt il consumo è di 12 ampère. Qual'è il consumo di

corrente di ogni lampada, quale la sua resistenza e quale la resistenza complessiva del circuito.

2.° Per illuminare un locale vi sono 10 lampade da 25 candele che consumano ciascuna 0,5 ampèr con 110 volt. Le lampadine sono disposte in derivazione. Si vuol inserire nel circuito una resistenza in modo che le lampadine abbiano a dare una luce lievissima di notte. Per far ciò è necessario abbassare la tensione delle lampade da 110 volt a 50 volt. Si domanda quale sarà la resistenza da inserirsi supposta invariata la resistenza delle lampade.

3.° Si hanno tre resistenze di 2-4-6 ohm in parallelo fra loro; il gruppo è in serie con una resistenza di 20 ohm. Alle estremità del gruppo delle resistenze così disposte viene applicata una tensione di 200 volt. Quale sarà l'intensità della corrente totale e quale quella assorbita da ciascuna resistenza.

4.° Un voltmetro da 10 volt contiene una resistenza interna di 1000 ohm. Cosa segnerà quel voltmetro se in serie ad esso io metto una resistenza di 9000 ohm, ammesso che le deviazioni siano proporzionali agli ampères passanti nel voltmetro.

5.° Un amperometro da 100 ampère ha una resistenza interna di un decimo di ohm. In parallelo fra i due serrafili metto una resistenza pure di un decimo di ohm. Quali indicazioni darà l'amperometro in confronto di prima.

30. Leggi di Kirchoff. — La legge di Ohm riguarda i conduttori semplici, ma nella pratica si incontrano molti casi di resistenze e conduttori collegati a maglie come ad esempio nelle reti di distribuzione di energia elettrica nelle città.

I punti A-B-C-D dove si congiungono i conduttori si dicono *nodi*.

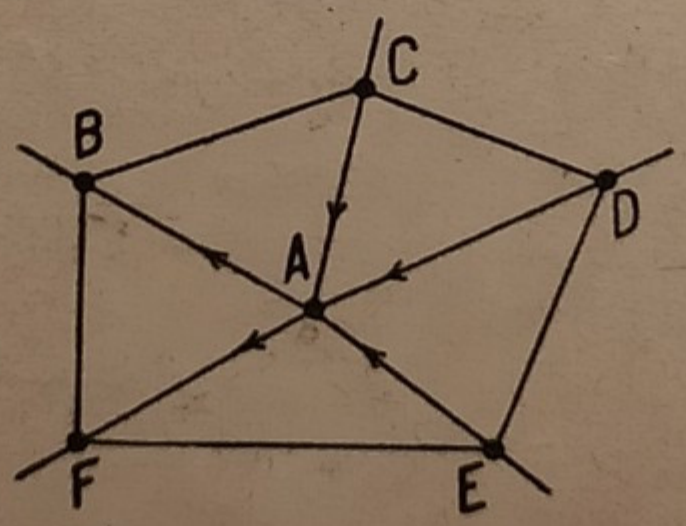


Fig. 34 - Conduttori a maglia.

La prima legge di Kirchoff stabilisce:

In un sistema di conduttori a maglie la somma algebrica delle intensità convergenti in ciascun nodo è zero.

Cioè tanta corrente affluisce in un nodo per mezzo di uno o più conduttori e altrettanta ne defluisce negli altri. Così nella fig. 34 se consideriamo un nodo qualsiasi, per esempio A, si osservano 3 correnti in un senso e due in un senso opposto; la somma delle prime tre è uguale a quella delle altre due.

La seconda legge è la seguente:

Considerando una maglia chiusa la somma algebrica delle cadute di tensione nei lati costituenti la maglia, è uguale alla somma algebrica delle f. e. m. inserite nel circuito stesso.

Le cadute di tensione sono espresse dal prodotto della intensità in Ampère per la resistenza in ohm.

Per applicare il giusto segno positivo o negativo alla somma algebrica basta percorrere i lati di una maglia in un determinato senso (per esempio quello delle sfere di un orologio) e prendere le f. e. m. che si incontrano positive o negative a seconda che tendono a produrre una corrente nel senso percorso o in senso contrario.

31. Potenza prodotta od assorbita da un apparecchio o circuito elettrico. — La potenza è il flusso di energia consumato da un circuito, da un apparecchio elettrico o generato da una dinamo, pila ecc. Essa è equivalente alla potenza espressa in cavalli o in chilogrammetri al minuto secondo che si adopera in meccanica.

Come la potenza idraulica di una turbina, pompa ecc., si misura moltiplicando la portata o flusso di acqua per il salto, così *la potenza prodotta o consumata da una corrente continua si ottiene moltiplicando l'intensità della corrente in ampère per la f. e. m. in volt* esistente fra le estremità del circuito che si considera.

L'unità di misura della potenza elettrica è il *watt*.

Un watt è la potenza corrispondente all'intensità di un ampère e alla f. e. m. di un volt. Perciò la potenza in watt prodotta od assorbita da un apparecchio o macchina attraversato da una corrente di I Ampère e avente gli estremi o morsetti una f. e. m. di E volt si esprime colla formola:

$$W = E \times I$$

Questa formola è esatta per i circuiti a corrente continua ma non sempre per quelli a corrente alternata.

Un *chilowatt* è mille watt.

Un *cavallo* è 736 watt.

Paragonando le unità di misura dell'energia meccanica e dell'energia elettrica si ha:

TABELLA N. 5 — Valori equivalenti delle unità di misura delle potenze

	Watt	kW	HP	Kgm al 1"
1 Watt = ...	1	0.001	0.00136	0.102
1 Chilowatt = ...	1000	1	1.36	102
1 Cavallo = ...	375	0.736	1	75
1 Chilogrammetro al 1" =	9.81	0.00981	0.0133	1

ESEMPIO. — Una dinamo a corrente continua fornisce una corrente di 300 Ampère a 500 Volt. Qual'è la potenza sviluppata dalla macchina?

R. La potenza sarà espressa in watt dal prodotto dell'intensità per la tensione ossia:

$$W = 300 \times 500 = 150000 \quad \text{ossia} \quad 150 \text{ chilowatt}$$

$$\text{ossia } 150 \times 1.36 = 204 \text{ HP}$$

La potenza delle macchine generatrici e trasformatrici della energia elettrica come dinamo, alternatori, trasformatori si riferisce sempre all'energia elettrica prodotta.

Invece la potenza dei motori elettrici si riferisce sempre all'energia meccanica prodotta.

Le potenze così specificate si dicono *potenze utili* o *rese* per distinguerle dalle potenze meccaniche od elettriche *assorbite*. La differenza che si constata in ogni macchina fra la potenza utile e quella assorbita costituisce la *perdita*. Questa perdita appare sotto forma di calore ossia di energia termica, perciò tutte le macchine si riscaldano. Il limite di potenza di una macchina è dato dal livello massimo di temperatura dei suoi organi principali, oltre il quale diventa pericoloso per la conservazione degli organi stessi.

Perciò il termometro è lo strumento che indica il limite di potenza delle macchine elettriche.

Multipli e sottomultipli delle unità di misura. — Per l'uso pratico invece di adoperare le unità di misura indicate che porterebbero in certi casi a espressioni con numeri o molto grandi o molto piccoli, si sono introdotti i multipli e sottomultipli adattando dei prefissi al nome delle unità.

Pei multipli: etto = 100 volte (per esempio ettowatt)
» chilo = 1000 volte (chilowatt, chilovolt, chilocicli)
» mega = 1000000 di volte (megaohm)
Pei sottomultipli: centi = 1/100 dell'unità (centiampère)
» milli = 1/1000 (milliampère)
» micro = 1 milionesimo (microohm)

32. Lavoro o quantità di energia. — Si dice lavoro o quantità di energia il complesso dell'energia prodotta o consumata in un determinato tempo. Come unità pratica si adopera il *watt--secondo o Joule*. Ma le unità pratiche più in uso sono il *wattora e il chilowatt-ora*. Siccome un'ora è 3600 minuti secondi, un Wattora sarà 3600 Watt secondi o Joule. Le quantità di energia Q in wattore è quindi espressa:

$$Q = W \times t$$

dove W sono i watt e *t* il tempo in ore. Ossia il lavoro o quantità di energia si ottiene moltiplicando la potenza in watt, supposta costante per il tempo.

Paragonando le diverse unità impiegate per misurare l'energia elettrica, meccanica, calorifica o termica si hanno i seguenti equivalenti:

TABELLA N. 6 — Valori equivalenti delle diverse unità di misura dell' energia.

	Joule	Watt-ora	kW-ora	Kgm	HP-ora	Calorie (kilogr.)
1 Joule = .	1	0.000278	278.10^{-9}	0.102	$0.378.10^{-6}$	0.00024
1 Watt-ora = .	3600	1	0.001	367.2	0.00136	0.864
1 kW ora = .	3600000	1000	1	367200	1.359	864
1 Kgm. = . .	9.81	0.00272	272.10^{-8}	1	$3.7.10^{-6}$	0.00235
1 HP-ora = .	2646810	736	0,736	270000	1	635.3
1 Caloria kg. .	4166	1,157	0.001157	425	0.001575	1

33. Rendimento delle macchine e apparecchi elettrici. — Secondo il principio di conservazione dell'energia, nelle trasformazioni da una forma in un'altra, consumando una data quantità di energia od una data potenza, si dovrebbe ottenere un'uguale quantità o potenza sotto altra forma. Nelle dinamo, motori, alternatori, accumulatori, pile, ecc, colle quali si compiono queste trasformazioni di energia si riscontra che *la potenza assorbita è sempre maggiore della potenza resa*, perchè una parte di energia viene perduta nelle macchine indicate in altre forme che non interessano. Così quando con una dinamo si compie la trasformazione di energia meccanica in elettrica una porzione, variabile fra il 6 e il 20 per cento, si perde in attriti, movimenti di aria, riscaldamenti, ecc.

Si dice *rendimento* il rapporto fra *la potenza resa* o prodotta, e *la potenza assorbita* o spesa.

La potenza assorbita è uguale alla potenza resa più le perdite.

Chiamando, η il rendimento, Wr la potenza resa, Wa la potenza assorbita e P le perdite, essendo tutte le quantità espresse colla medesima unità di misura, avremo:

$$\eta = \frac{Wr}{Wa} = \frac{Wr}{Wr + P} = \frac{Wa - P}{Wa}$$

Conoscendosi il rendimento di una macchina, la potenza resa si ha moltiplicando quella assorbita per il rendimento; viceversa la potenza assorbita si ottiene dividendo la potenza resa per il rendimento.

Talvolta il rendimento degli apparecchi elettrici, specie di riscaldamento e per gli accumulatori, viene riferito alla *quantità di energia*. Cioè si dice rendimento in energia il rapporto fra i watt-ora assorbiti o spesi ed i watt-ora resi.

Regola importante.

Quando in una macchina o in un processo industriale si compiono diverse successive trasformazioni di energia, *il rendimento complessivo è il prodotto dei singoli rendimenti*. Così se una turbina idraulica muove una dinamo; la dinamo alimenta una linea; la linea fornisce energia ad un motore il

TABELLA N. 7 - Del rendimento di alcune macchine ed apparecchi.

	%		%
Dinamo e motori c. c. fino a 10 KW	73-85	Accumulatori in amp-ore	90
Dinamo e motori c. c. da 20-50 KW	86-89	Accumulatori in watt-ore	70-75
Dinamo e motori c. c. da 100 KW in piú . . .	89-96	Trasform. fino a 10 KW	93-96
Alternatori fino a 10 KW.	70-75	Trasform. da 10 a 100 KW	96-98
Alternatori da 10 a 50 KW.	80-85	Trasform. da 1000 KW in su	98-99
Alternatori da 50 KW in su	85-95	Apparecchi domestici di riscaldamento	60-90
Motori trifasi da 0.1 a 7.5 HP	65-86	Pompe a stantuffo . . .	85-89
Motori trifase da 10 a 70 HP	86-92	Pompe centrifughe . . .	70
Motori trifasi da 100 in su	90-95	Meccanismi di sollevamento per gru	50-60
Turbine idruliche e ruote Pelton :		Verricelli con riduzione, ingranaggi ecc. . . .	30-50
con apertura 1/10 . . .	37	Riduzioni con coppie dentate cilindriche fresate .	95
» 2/10 . . .	58	Riduzioni con vite perpetua	93
» 3/10 . . .	70	Caldaie elettriche . . .	90
» 4/10 . . .	76	Gruppi motori-dinamo .	80-85
» 5/10 . . .	78	Converter o commutatrici	85-92
» 6/10 . . .	80	Rettificatori a vapori di mercurio	90-95
» 7/10 . . .	82		
» 8/10 . . .	83		
» 9/10 . . .	82		
» 10/10 . . .	80		

rendimento complessivo, è il prodotto dei rendimenti della turbina, della dinamo, della linea e del motore.

Esercizi pratici di calcolazione.

1.° Un motore a corrente continua consuma 50 Amp. e 125 Volt. Si domanda il consumo in watt, in chilowatt, e la forza sviluppata in HP., sapendo che il rendimento è 0,85.

R. La potenza assorbita in watt sarà $50 \times 125 = 6250$ ossia 6,25 kW. Siccome un HP vale 736 watt, la potenza assorbita sarà:

$$6250 : 736 = 8.5 \text{ cavalli elettrici}$$

e la potenza meccanica sviluppata sarà:

$$8.5 \times 0.85 = 7.22 \text{ cavalli meccanici}$$

2.° Una dinamo è azionata da una turbina di 60 HP e può sviluppare una tensione di 500 V. Il suo rendimento è 0,9. Si domanda la potenza resa dalla dinamo e l'intensità della corrente.

R. La turbina sviluppa 60 × 736 ossia 44160 watt; la potenza resa dalla dinamo sarà 44160 × 0,9 ossia 39744 watt. Dividendo i watt per i volts si avrà l'intensità della corrente: 39744 : 500 = 79,48 ampère.

3.° Una pompa centrifuga azionata da un motore elettrico deve sollevare 60 litri al 1" all'altezza di 12 m. Il rendimento della pompa si presume di 0,70; quello del motore 0,85. Quale sarà la forza in HP data dal motore e quanti watt esso assorbirà?

R. La pompa deve eseguire un lavoro di 60 × 12 = 720 chilogrammetri al 1". Essendo il suo rendimento di 0,7 essa richiederà dal motore 720 : 0,7 = 1028 chilogrammetri. Essendo un HP pari a 75 chilogrammetri il lavoro assorbito dalla pompa sarà 1028 : 75 = 13,7 HP; ed essendo un HP uguale a 736 watt la stessa potenza sarà 13,7 × 736 = 10083 watt. La potenza elettrica assorbita sarà infine: 10083 : 0,85 = 11850 watt.

4.° Una cascata d'acqua è utilizzata sopra un fiume che ha una portata di 5000 litri al 1" e un salto di 6 m. Si vorrebbe accoppiare alla turbina che utilizza il salto un alternatore. Il rendimento delle turbine è in media 0,75 e quello degli alternatori di 0,92. Quanti chilowatt di energia può fornire l'alternatore?

R. La potenza teorica offerta dalla cascata è data da:

$$\frac{5000 \times 6}{75} = 400 \text{ HP pari a } 400 \times 0.736 = 294.4 \text{ chilowatt}$$

il rendimento complessivo della turbina e dell'alternatore è 0,75 × 0,92 ossia 0,69; quindi l'alternatore potrà sviluppare 294,4 × 0,69 ossia 203 kW.

5.° Un impianto idroelettrico dispone di una potenza meccanica di 500 HP sull'asse della turbina. La turbina aziona un alternatore avente un rendimento di 0,92. La tensione della corrente prodotta dall'alternatore viene elevata con un trasformatore col rendimento di 0,95. La corrente ad alta tensione viene trasmessa in una linea calcolata per una perdita del 10%. (Rendimento = 0.90). All'estremità della linea la corrente alta tensione viene ritrasformata a bassa tensione con un trasformatore avente il rendimento 0,95 ed infine l'energia viene utilizzata con dei motori che hanno un rendimento medio di 0,80. Si domanda quanti HP effettivi o meccanici si potranno ricavare dai motori.

R. Il rendimento complessivo è espresso dal prodotto dei rendimenti delle singole trasformazioni:

$$0.92 \times 0.95 \times 0.90 \times 0.95 \times 0.80 = 0.597$$

Dei 500 HP originari sull'asse della turbina si potranno utilizzare:

$$500 \times 0.597 = 298,5 \text{ HP}$$

6.° In un impianto di illuminazione elettrica si sono consumati 15 ampère costanti a 110 Volt per 4 ore. Quanti ettowatt-ore sono stati consumati?

R. La quantità di energia consumata sarà:

$$15 \times 110 \times 4 = 6600 \text{ Watt-ora ossia } 66.00 \text{ ettowatt-ora}$$

7.° Un fornello elettrico deve far bollire 5 litri d'acqua all'ora prendendola ad una temperatura di 15°. Quanta energia elettrica consumerà il fornello ad ogni ora supposto che il suo rendimento sia 0,80?

R. Per portare l'acqua da 15° all'ebollizione ossia a 100°, sapendosi che ogni caloria richiede 1,157 watt-ora (come dalla tabella 8) avremo:

$$\frac{1.157 \times (100 - 15) \times 5}{0.8} = 614 \text{ watt-ora all'ora}$$

La potenza consumata dal fornello sarà 614 watt.

8.° Quanta energia elettrica possono dare teoricamente

1 chilogrammo di carbone da 7000 calorie.
1 chilogrammo di olio pesante avente 11500 calorie.
1 metro cubo di idrogeno avente 29100 calorie per mc.
1 metro cubo di gaz illuminante a 10000 calorie per mc.

R. Sapendosi che un chilowatt-ora equivale a 864 calorie, dividendo le succitate calorie per 864 si avrà:

1 kg. di carbone equivale a 8,1 kW-ore.
1 kg. di olio pesante equivale a 13,3 kW-ore.
1 mc. di idrogeno equivale a 33,6 kW-ore.
1 mc. di gaz equivale a 11,5 kW-ore.

9.° Per muovere una vettura tramviaria del peso di 20 tonn. alla velocità di 15 chilometri all'ora in piano occorre uno sforzo di trazione in media di 10 Kg. per ogni tonnellata di peso. Il rendimento del motore elettrico e degli ingranaggi è 0,7. Si domanda la potenza assorbita dalla vettura in moto.

R. Bisogna anzitutto trovare i chilogrammetri al minuto secondo:

$$\frac{20 \times 10 \times 15000}{3600} = 833 \text{ chilogrammetri al 1''}$$

L'energia assorbita sarà:

$$833 : 0.7 = 1190 \text{ chilogrammetri}$$

ed essendo 1 Kgm. equivalente a 9,81 watt, l'energia assorbita in watt sarà:

$$1190 \times 9.81 = 11674 \text{ watt.}$$

Esercizi a risolversi

1.° Un apparecchio di illuminazione ha consumato 10 Amp. per 2 ore; poi 20 Amp. per mezz'ora; poi 50 Amp. in 10'. Quanti ampère-ora si sono consumati in totale?

2.° Il contatore di un impianto elettrico ha segnato in 6 ore 300 ettowatt-ora. Quanti watt-medi furono consumati nel tempo indicato?

3.° Qual'è la spesa mensile di illuminazione con ciascuna delle lampade da 16-25-50 candele a filamento metallico, sapendo che il consumo specifico è di 1,2 watt per ogni candela e supposto che l'accensione sia di 3 ore per ogni sera e che il costo dell'energia è di 12 cent. all'ettowatt-ora?

4.° In un circuito è inserito un contatore il quale segna 200 watt-ore ogni 20". Quale sarà il consumo in un'ora? quale la potenza media consumata?

5.° Un essicatoio è alimentato con aria calda scaldata con resistenze elettriche ed esige 12000 calorie all'ora. Quanti chilowatt continui sono necessari per produrre questo calore?

6.° Uno stabilimento ha installato 30 lampade elettriche da 25 candele e 20 da 50 candele che consumano 1,2 watt per candela; due motori da 5 HP col rendimento di 0,85. Le lampade stanno accese in media 3 ore per sera, i motori funzionano 10 ore. Quanti chilowatt consuma il detto stabilimento e quanti chilowatt-ore al giorno?

7.° Qual'è il rendimento di un riscaldatore d'acqua elettrico il quale riempito d'acqua pari a due litri con temperatura di 15°, si è messo in piena ebollizione consumando 210 watt-ora.

8.° Una linea di 800 m. con due fili da 4 mm. deve trasmettere la corrente a 30 lampade da 16 candele a 110 V (in derivazione). Le lampade hanno un consumo specifico di 1.3 watt per candela. Si domanda:

1.° la resistenza della linea
2.° la potenza trasmessa
3.° l'intensità della corrente
4.° la perdita di linea in volt
5.° la tensione all'inizio della linea per mantenere 110 V alle lampade.

34. Riscaldamento dei conduttori. - Legge di Joule. — L'attrito che la corrente elettrica trova nel passare nei conduttori (parag. 25) crea in essi un riscaldamento. Questo fenomeno si chiama *effetto Joule* dal nome dell'insigne fisico che studiò la legge del riscaldamento.

La quantità di calore dissipata in un conduttore al 1" sarà equivalente alle energia che si perde nel conduttore stesso:

$$W = e \times I$$

dove W esprime i watt: e è la caduta di tensione nel conduttore espressa in volt; I l'intensità in ampère. Siccome per la legge di Ohm $e = IR$, sostituendo si ha:

$$W = I^2 R$$

che esprime la legge di Joule: *la potenza trasformata in calore nei conduttori è proporzionale alla loro resistenza ed al quadrato dell'intensità*. L'equivalente fra l'energia elettrica e termica è dato dalla tabella 6 al parag. 32.

Moltiplicando la potenza in W dissipata per il tempo si avrà la *quantità d'energia* dissipata in calore espressa in watt-secondi o in watt-ora.

Però si possono esprimere direttamente le calorie svolte ricordando che un watt-secondo equivale a 0,00024 calorie e che un watt-ora corrisponde a 0,864 calorie, ecc.:

Calorie per ogni I" = 0,00024 RI^2
Calorie per ogni ora = 0,864 RI^2
Calorie per ogni chilowatt-ora = 864
Una caloria = 1.157 watt-ora
Una caloria = 4166 joule.

Se di un conduttore si conosce la resistenza R e la f. e. m. assorbita e, la potenza resa in calore o consumata dal conduttore si può esprimere anche colla formola:

$$W = \frac{e^2}{R}$$

1.° Determinare quanti watt si perdono in una linea formata da due conduttori di rame lunghi ciascuno 1000 m. colla sezione di 5 mmq. quando sono percorsi da una corrente di 30 amp.

R. La resistenza totale dei due conduttori è:

$$0.017 \frac{2000}{5} = 6.8 \text{ ohm}$$

La potenza perduta per effetto totale sarà:

$$6.8 \times 30^2 = 6120 \text{ watt.}$$

2.° Si vuole produrre con una resistenza elettrica di filo di ferro o altro, un calore equivalente a quello di una stufa a carbone che

consuma 1 kg. di carbone all'ora col rendimento dell'80%, impiegando corrente stradale a 120 volt. Quale valore dovrà avere la resistenza?

R. Supposto che il calore sviluppato da 1 Kg. di carbone sia di 6000 calorie, esso corrisponde a

$$6000 \times 1{,}151 = 6942 \text{ watt-ora.}$$

Ossia la resistenza dovrà produrre

$$6942 : 0{,}8 = 8680 \text{ watt-ora all'ora}$$

ossia consumare 8680 watt.

Avremo:

$$8680 = \frac{120^2}{R}$$

da cui R = 1.66 ohm.

Per la scelta del filo vedi più avanti.

34. Densità della corrente ed effetto sul riscaldamento dei conduttori. — Abbiam visto che la densità della corrente in un conduttore è espressa dal numero di ampère passanti per ogni mmq. di sezione. Indicando con I la intensità della corrente, s la sezione in mmq., d la densità si avrà:

$$d = \frac{I}{s} \qquad \text{ossia} \qquad I = d \times s$$

ed essendo D il diametro del filo espresso in mm. si ha:

$$s = \frac{\pi D^2}{4} \qquad I = d \frac{\pi D^2}{4} \qquad \text{ossia} \qquad d = \frac{4 I}{\pi D^2}$$

cioè la densità della corrente è inversamente proporzionale, per una data intensità, al quadrato del diametro. Per la legge di Joule l'energia consumata in riscaldamento è data (vedi anche parag. 25):

$$W = R I^2 = \frac{\rho l}{s} I^2 = \rho l \frac{4 I^2}{\pi D^2}$$

cioè a *parità di intensità* di corrente il calore perduto è inversamente proporzionale al quadrato del diametro. Se facciamo passare una corrente I per un filo di diametro metà od un terzo, il calore prodotto è quattro volte, nove volte maggiore.

L'aumento di temperatura che assume un conduttore al passaggio della corrente sarà proporzionale all'energia prodotta per effetto Joule ed inversamente proporzionale alla superficie d'irradiazione. Inoltre influiscono sulla temperatura la ventilazione dell'aria ambiente, la rugosità e il colore della superficie ecc.

Come conduttori riscaldanti degli apparecchi elettrici si adoperano fili e piattini di ferro, acciaio, argentana, nichel e nichel-cromo. Con quest'ultima lega si possono raggiungere temperature da 500° fino a 1000°; con gli altri metalli non si può sorpassare 300° perchè si ossidano. Circa la densità di corrente da assegnarsi ai conduttori riscandanti non vi sono formole sicure e conviene ricorrere alle tabelle esposte nei manuali speciali o date dai costruttori.

La tabella 8 dà le densità di corrente usate nei fili di rame coperti di isolante tesi negli ambienti interni e dei cavi sotterranei in modo da non sorpassare 40° C. circa la temperatura ambiente.

TABELLA N. 8 — Densità usuali di corrente nei fili e nei cavi

Fili per interno e sbarre di rame		Cavi sotterranei unipolari	
Sezione mmq.	Densità Amp. mmq.	Sezione mmq.	Densità Amp. mmq.
0.75	12	10	10-12
1	11	16	9-10
1.5	9.3	25	7
2.5	8	35	6.3
4	6.25	50	5.2
10	4.3	70	4.4
25	4	95	4
50	3.2	120	3.5
150	3.16	150	3.3
300	1.75	185	3
400	1.6	240	2.4-2.8
500	1.4		
1000	1.25		

N. B. - Per cavi cordati a due conduttori la densità si deve ridurre al 70 % e per tre conduttori al 60 %.

Pei fili di avvolgimento delle macchine e trasformatori si calcola 2-3 Amp. per mmq. e fino a 20-30 mmq. Per sezioni più grandi si calcola 2 Amp. per mmq.

35. Calcolazione degli apparecchi di riscaldamento. — Ricordiamo che i corpi richiedono per scaldarsi diversa quantità di calore e che si dice *calore specifico* di un corpo le calorie necessarie per elevare di un grado centigrado un chilogrammo di peso del corpo stesso.

L'energia Wh in wattora per scaldare o fondere un peso P Kg. di sostanza avente un calore specifico *h* fra le temperature *t* e *t*, è data dalla formola:

$$Wh = \frac{P \times h \times (t_1 - t)}{1.157}$$

TABELLA N. 9 - Calori specifici dei corpi

METALLI	Calore specifico		MATERIALI	Calore specifico	
	a circa 15°	al punto di fusione		Temper. C.	Calore spec.
Argento	0,055	0,076	Acqua	0°	1
Alluminio	0,167	0,308	Ottone	15°	0,09
Antimonio	0,048	0,054	Acciaio	1300°	0,15-0,20
Cadmio	0,054	0,062	Muratura	15°	0,20
Cobalto	0,106	0,204	Grafite	—	0,16
Ferro	0,116	0,162	Vetro	—	0,12-0,20
Mercurio	0,033	0,032	Ghiaccio	—	0,502
Nichel	0.109	0,161	Quarzo	0°-350°	0,17-0,28
Platino	0,032	0,046	Legno	—	0,45-0,65
Piombo	0,030	0,034	Sabbia	0-100°	0,12
Rame	0,091	0,118	Alcool	15°	0,65
Stagno	0,055	0,059	Olio	15°	0,50
Zolfo	0,163	0,235	Aria (pr. cos)	20°	0,24
Zinco	0,093	0,120	Gaz circa	—	0,2-0,3

Se si tratta di fondere o vaporizzare una sostanza bisogna aggiungere all'energia di riscaldamento le calorie latenti di fusione o vaporizzazione che si possono trovare nei manuali.

Così per calcolare le calorie necessarie ad asciugare, essicare una sostanza o concentrare una soluzione bisogna aggiungere alle calorie di riscaldamento quelle di evaporazione dell'acqua. Tali calorie sono date per ogni chilogramma d'acqua preso a 0^0 e convertito in vapore saturo a t^0 dalla formola:

$$\text{Calorie Kg.} = 606{,}5 + 0{,}305\ t^0$$

Dividendo i watt-ora ottenuti per il tempo in ore in cui si vuol compiere l'operazione si otterrà la potenza continua in watt.

Per un'esatta valutazione dell'energia bisogna tener conto dei disperdimenti di calore attraverso le pareti dell'apparecchio e che non concorrono all'effetto voluto. Infatti il calore si sperde *per conduzione*, per *irradiazione*, per *convezione*, ossia per trasporto a mezzo dell'aria lambente le pareti calde.

In certi apparecchi tali disperdimenti si possono calcolare servendosi dei coefficenti di dispersione che si trovano sui manuali.

Di solito gli apparecchi riscaldanti per uso domestico e per uso industriale (caldaie elettriche) hanno un rendimento fra 0,9 e 0,7. Data l'incertezza del calcolo di questo rendimento conviene tenere una certa larghezza salvo poi introdurre varianti nel corpo riscaldante.

Fissati i watt che deve consumare l'apparecchio riscaldante, conoscendosi la tensione E disponibile, si trova la corrente I in ampère:

$$I = \frac{W}{E}$$

Si sceglie come conduttore riscaldante uno dei metalli ad alta resistività offerti dal commercio: ferro-nichel, argentana, nichelina, nichel-cromo, nichel, ecc. Si fissa la densità in base alle indicazioni dei fornitori in modo di ottenere approssimativamente una determinata temperatura. Infine si trova la sezione e infine la lunghezza colle formole al paragrafo 25.

ESEMPIO 1.° — Calcolare l'energia elettrica necessaria per fondere in un fornello elettrico Kg. 5 di piombo ogni 10' supposto che il rendimento sia 0,75.

R. Il calore specifico del piombo è 0,034; la temperatura di fusione di 327°. Il calore latente di fusione circa 6. Avremo:

$$\frac{5 \times 327 \times 0{,}034 + 5 \times 6}{1{,}157 \times 0{,}75} = 98 \text{ Watt-ora}$$

La potenza necessaria per una fusione continua di 5 Kg. ogni 10 minuti sarà:

$$98 \times 60 : 10 = 588 \text{ watt}$$

ESEMPIO 2.° — Si devono essicare 4 quintali all'ora di un prodotto industriale che contiene il 50% di acqua, mediante ventilazione in aria calda. L'essicamento si ottiene stendendo il prodotto su telai orizzontali messi su vagonetti ai quali si fa percorrere una galleria di 20-30 metri. L'aria è presa a 20° riscaldata a 101 ed esce a 35 percorrendo la galleria. Le perdite di calore si presumono del 20%. Il riscaldamento dell'aria si ottiene facendola passare attraverso ad una resistenza elettrica formata da nastri di ferro sottili. Si domanda il volume d'aria e l'energia elettrica necessaria.

R. L'acqua da evaporare è di 200 Kg. all'ora. La temperatura media di vaporizzazione nella galleria è:

$$\frac{101 - 35}{2} = 33$$

e le calorie per Kg. sono date da:

$$606{,}5 + 0{,}305 \times 33 = 619$$

Calorie utili: 619 × 200 = 123800 alle quali si aggiungono le perdite del 20% ossia 123800 + 20% = 148560 ossia circa 150000.

Il calore specifico dell'aria è 0,244 per Kg.

Il salto di temperatura utilizzato è 101 — 35 = 66°.

Il calore assorbito sarà quindi 66 × 0,244 = 16,1 calorie per Kg.

Per assorbire queste calorie occorreranno all'ora 150000 : 16,1 = 9350 Kg. ossia (peso spec. dell'aria Kg. 1,25) 8000 circa mc. di aria.

Siccome l'aria è presa a 20° e riscaldata a 101° ossia elevata di temperatura di 81°, il calore di riscaldamento sarà; 81 × 0,244 × 9350 = 185000 calorie pari a 185000 : 864 = 215 Kwh. (Un Kwh è uguale a 864 calorie) ossia occorrerà una potenza di 215 Kw. continui.

Rendimento: 123800 : 185000 = 0.70

APPLICAZIONI DELL'EFFETTO JOULE.

Daremo qui un riassunto sommario delle applicazioni dell'effetto Joule nei conduttori.

1.° *Lampade ad arco.* — Facendo passare una corrente tra due punte di carbone queste diventano incandescenti; fra le punte si formà una fiamma di gaz ad altissima temperatura (3000° a 3500°). Questa fiamma si dice arco voltaico e di questo fenomeno se ne approfitta per creare delle lampade e dei proiettori con luci intensissime e potenti.

Per mantenere costante la distanza delle punte di carbone, le aste vengono montate per mezzo di meccanismi regolati da elettromagneti i quali fanno avvicinare od allontanare le punte in modo di mantenere fra esse una distanza costante ed avere una intensità costante. (Fig. 37-38-39).

Le lampade ad arco possono essere a corrente continua ed alternata; le tensioni normalmente impiegate sono di 40-50 Volts per le lampade a corrente continua e poco meno per quelle a corrente alternata.

2.° *Lampade ad incandescenza.* — Queste lampade sono formate da ampolline di vetro in cui viene introdotto un filamento di tungsteno sottilissimo, da 2 a 5 centesimi di millimetro di diametro; nell'appollina si fa il vuoto affinchè l'ossigeno non abbia a ossidare il filamento. Facendo passare della corrente nel filamento questo per effetto Joule diventa incandescente (2000° . 2200). Una volta si impiegavano fili di carbone per le lampade incandescenti; ma questi a parità di luce emessa consumavano maggior energia. Il consumo delle lampade normali a filamento metallico è di 1,2 a 1,5 Watt per candela; quello delle lampade a filamento di carbone è di 3,5 watt per candela; si costruiscono

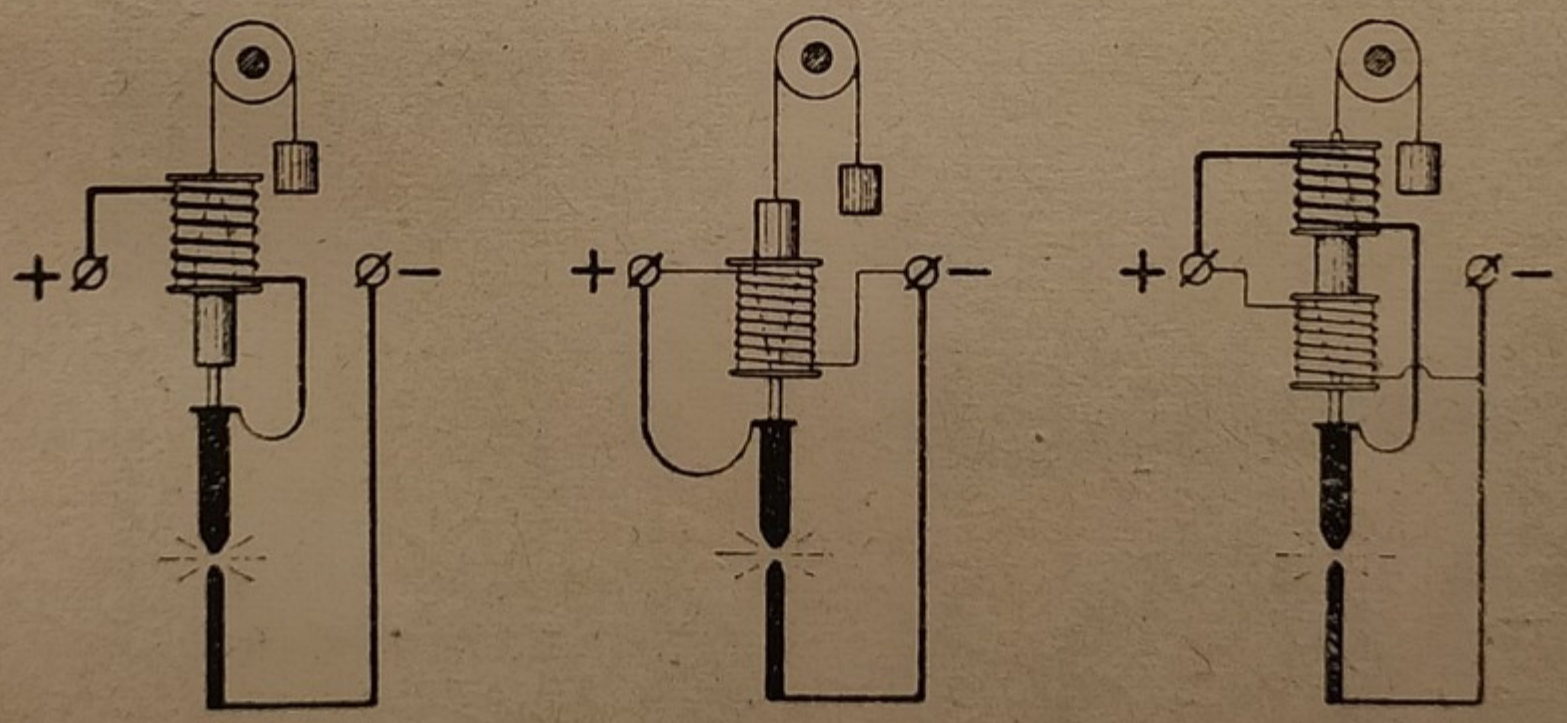


Fig. 37 - 38 - 39 - Regolatori per lampade ad arco.

anche lampade a consumo ancor più ridotto ossia a 1/2 watt per candela; queste lampade invece di avere l'ampolla col vuoto, contengono un gaz inerte, generalmente azoto puro. La tensione impiegata per le lam-

padine è di 35-50-75-100-110-120-150 volts; l'intensità luminosa varia da poche candele fino a migliaia di candele. I tipi più correnti sono da 16-25-32-50 candele.

3.° *Stufe elettriche, apparecchi domestici di riscaldamento.* — Tutti questi apparecchi contengono dei fili ad alta resistenza specifica che si fanno riscaldare per mezzo di corrente. Come conduttori si impiegano fili o nastri di ferro, ferro-nichel, acciaio nichel-ferro, nichel-cromo ecc. Ma le leghe per gli apparecchi più comuni sono il ferro-nichel, il nichel-cromo e il ferro-nichel-cromo. Queste leghe, specialmente quelle di nichel-cromo (che in commercio assumono il nome di « nicrom, ohmite » ecc.), hanno una alta resistività, alta temperatura di fusione e sono poco ossidabili. La scelta delle leghe da impiegare dipende dalla temperatura che si vuol raggiungere. La temperatura dei fili sottili di nichel-cromo per gli apparecchi domestici varia da 400° a 600°, quantunque esternamente si misurino solo 100° . 300°. I fili di resistenza si adoperano in forma di spiraline oppure vengono avvolti su anime di mica e vengono racchiuse nei ferri da stiro, nei fondi delle pentole elettriche, nei fornelli ecc. (Fig. 40).

4.° *Saldatura elettrica.* — Approfittando dell'alta temperatura dell'arco voltaico si può eseguire la saldatura di pezzi di ferro, ghisa, ecc. Vi sono diversi sistemi di saldatura elettrica. 1.° impiegando l'arco voltaico tra il pezzo da saldare e un elettrodo di carbone; 2.° impiegando ancora l'arco voltaico tra il pezzo da saldare e un elettrodo di ferro

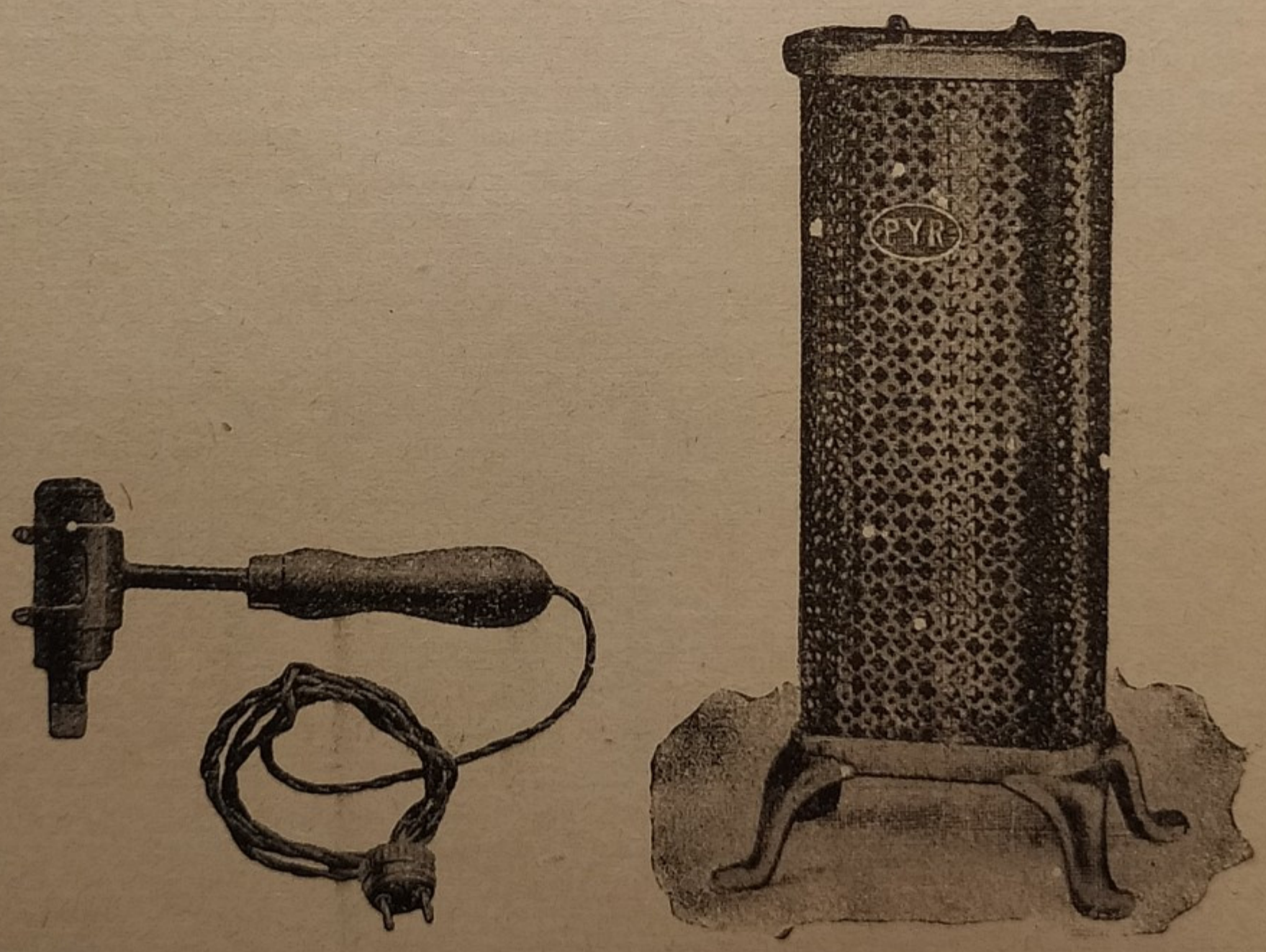


Fig. 40 - Saldatoio comune a stagno e stufa elettrica.

dolcissimo; 3.° premendo fra loro i pezzi da saldare e facendo passare una corrente molto intensa con una tensione bassissima. Per questo ultimo sistema di saldatura si costruiscono delle macchine saldatrici colle quali facilmente si eseguisce l'operazione di saldare fra loro pezzi qualsiasi di ferro e lamierini per fare dei recipienti.

5.° *Forni elettrici.* — I forni elettrici sono formati da recipienti di lamiera di ferro foderati di materiale refrattario: mattoni di magnesite, dolomite, silice, ecc. Nel cavo interno del forno si fanno entrare uno, due o tre carboni facendo scoccare un arco voltaico con grandi intensità di corrente. L'alta temperatura sviluppata dall'arco fa fondere qualsiasi materiale; e si approfitta del fenomeno per fondere ghisa, acciaio, ferro e sue leghe, alluminio, carburo di calcio, rame e sue leghe, carburo di silicio o carborundum, composti chimici e leghe d'ogni sorta che richiedono alte temperature per la loro formazione.

Nella fig. 41 sono rappresentati schematicamente i tre tipi più diffusi di forni per acciaio e ghise.

6.° *Valvole fusibili.* — Una vasta applicazione dell'effetto Joule lo si ha nelle valvole fusibili per impianti elettrici. Lo scopo dei fusibili, dette

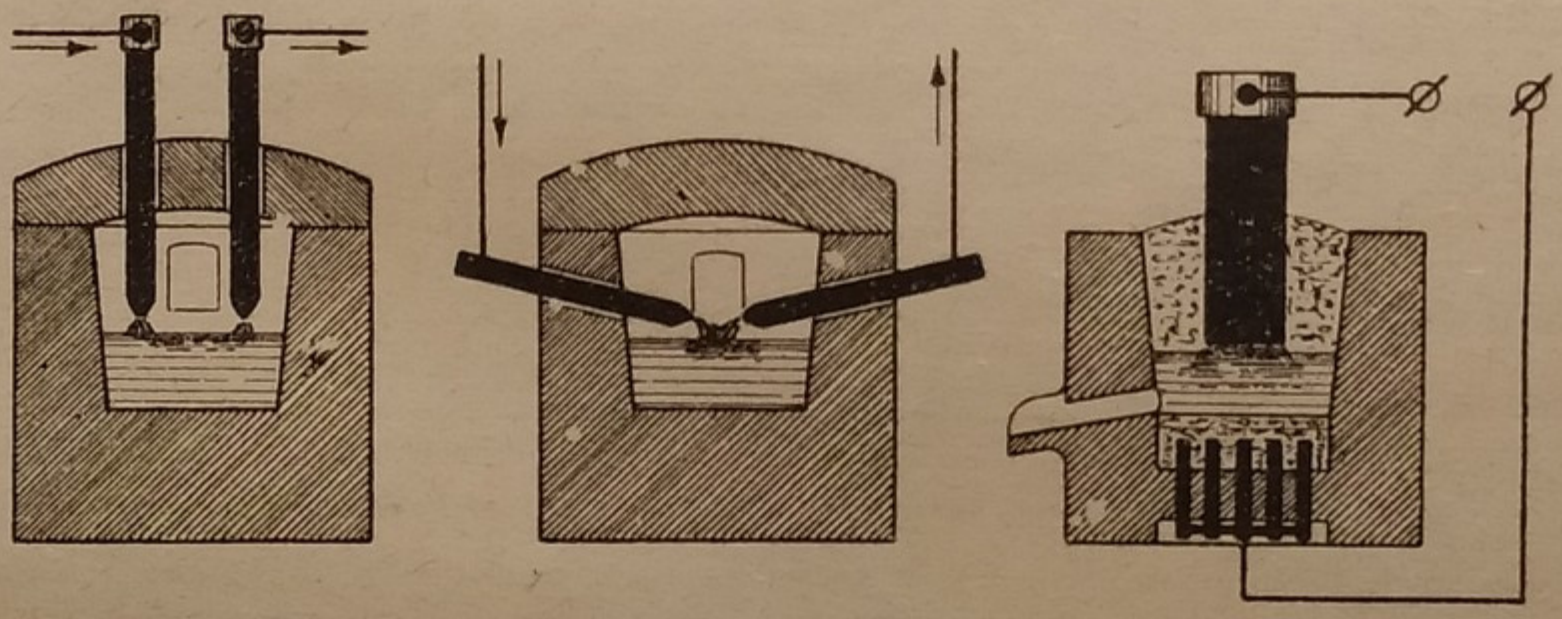


Fig. 41. - Tipi diversi di forni elettrici.

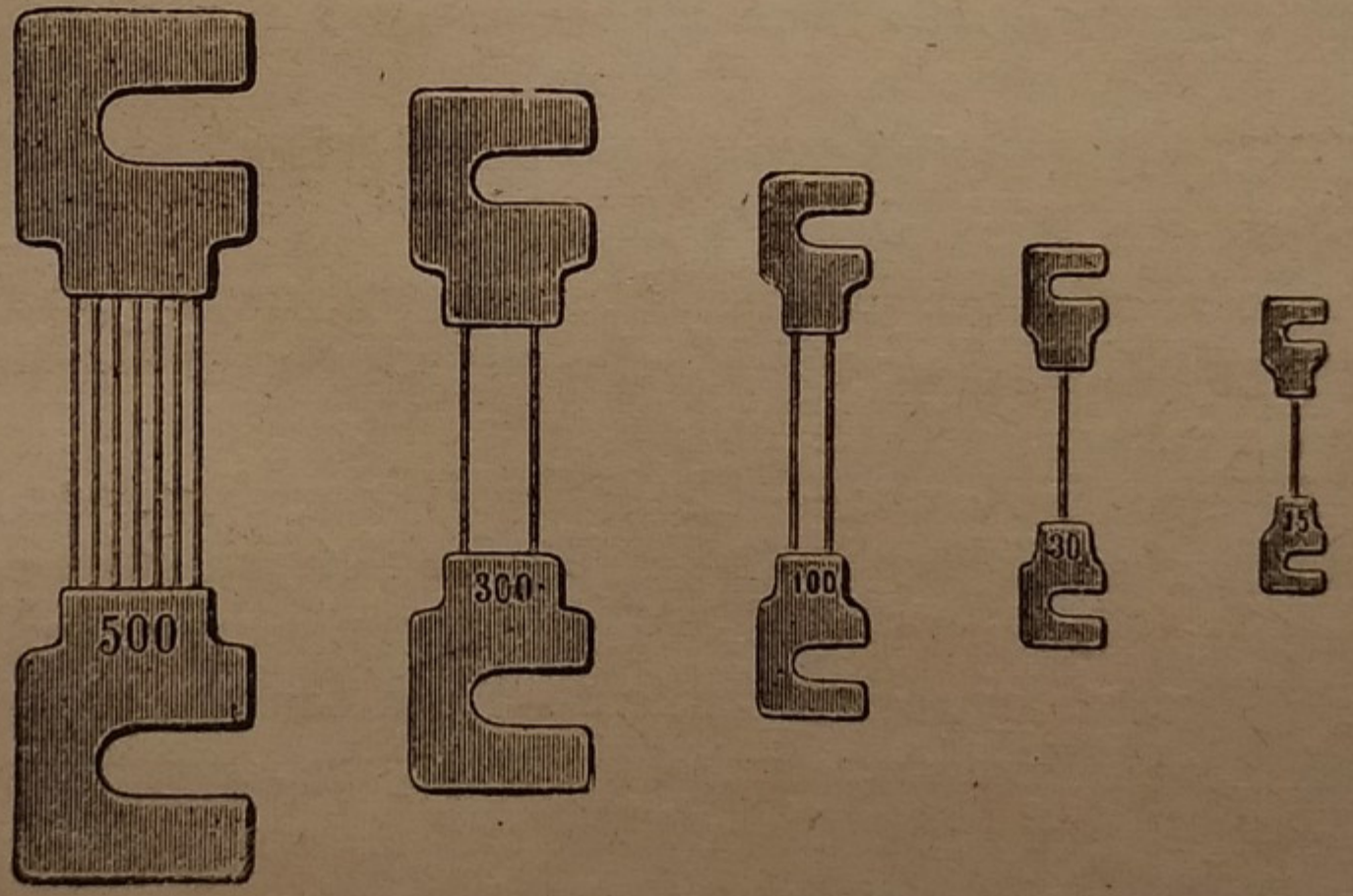


Fig. 42. - Valvole fusibili.

anche valvole di sicurezza, è quello di interrompere la corrente di un impianto, di una macchina elettrica qualsiasi, quando l'intensità diventa troppo grande e tale da creare pericoli di incendio per soverchio riscaldamento dei conduttori dell'impianto o della macchina. Le valvole fusibili sono formate di fili sottili di piombo, o leghe di piombo, antimonio, stagno e argento. Questi fili vengono intromessi sul percorso della corrente e la loro grossezza è calcolata in modo da fondersi quando la intensità della corrente sorpassa determinati limiti (Fig. 42).

7.° *Strumenti di misura a dilatazione di filo.* — In questi strumenti un filo sottile A - B di metallo inossidabile viene teso per mezzo di una piccola molla (Fig. 43). Passando la corrente nel filo questo si allunga e l'allungamento viene comunicato per mezzo di una carrucola all'indice di un istrumento il quale segna una deviazione sopra un quadrante. Gli spostamenti dell'indice sul quadrante possono misurare gli ampère passanti. Seguendo questi principii si costruiscono voltometri ed ampèrometri.

8.° Altre applicazioni dell'effetto Joule sono: apparecchi chirurgici per galvano caustica formati da piccole anse di platino arroventate dalla corrente e capaci di tagliare e cauterizzare la carne; stufe, essicatoi industriali, caldaie a vapore, distillatori, stoffe riscaldanti, ecc.

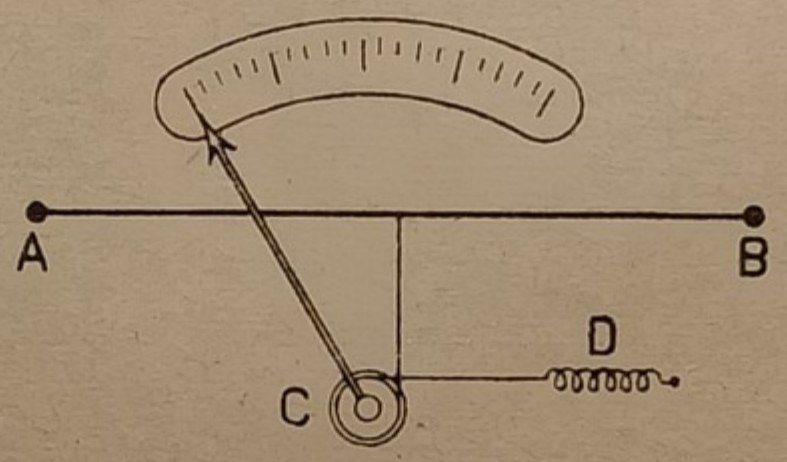


Fig. 43 - Schema di uno strumento misuratore a dilatazione di filo.

37. Effetti termoelettrici speciali Seebeck e Peltier. — Oltre all'effetto Joule di riscaldamento dei conduttori dovuto ad un vero attrito esercitato dalla corrente contro le molecole, vi sono altri effetti termici che dipendono dalla struttura dei corpi e sono:

1.° *Effetto Seebeck.* — Il Seebeck aveva trovato (1823) casualmente che scaldando fra le dita una congiunzione di due fili di rame e bismuto attaccati ad un galvanometro questo segnava corrente. In seguito all'esame del fenomeno stabilì la regola che tutte le volte che si riscalda una congiunzione o saldatura di due metalli diversi fra essi si crea una f. e. m. e se il circuito è chiuso si forma una corrente.

La f. e. m. che si sviluppa è molto piccola e nell'ordine di

pochi millesimi di volt. Una coppia così formata si dice *coppia termoelettrica.*

ESPERIMENTO: si prendano due pezzi di metallo diversi per esempio di rame e argentana, ferro e bismuto ecc. e si faccia una congiunzione attorcigliando due capi e attaccando le estremità libere ad un galvanometro. Scaldando la congiunzione con un fiammifero si verifica una deviazione del galvanometro. (Fig. 44).

2.° *Effetto Peltier.* — Peltier, orologiaio parigino, scoprì nel 1834 che, inviando una corrente in un conduttore formato da una serie di pezzi di fili di metalli diversi, le congiunzioni si scaldavano o si raffreddavano a seconda del senso che aveva la corrente. Si aveva cioè un effetto contrario a quello scoperto dal fisico Seebeck.

I metalli semplici si possono disporre in una serie in modo che passando la corrente da un metallo all'altro il punto di contatto si raffredda se la corrente è nel senso della serie e si riscalda se la corrente passa in senso contrario. Ecco la serie:

Bismuto, mercurio, platino, oro, rame, stagno, alluminio, piombo, zinco, argento, ferro, antimonio.

La stessa serie offre il fenomeno contrario cioè: se si provoca in ciascuna unione di metallo con metallo un riscaldamento si ottiene una corrente diretta nel senso della serie. Per esempio in un coppia platino ferro la corrente provocata da riscaldamento è nel senso platino-ferro. Quando si provoca un raffreddamento la f. e. m. è in senso contrario.

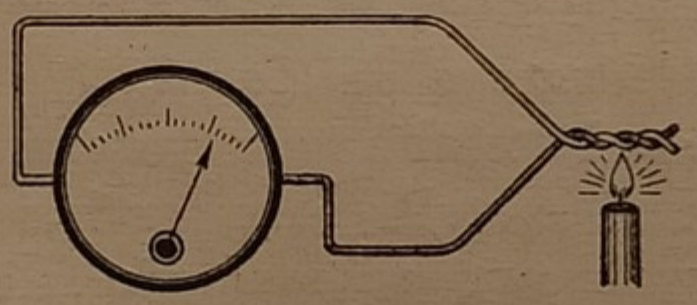


Fig. 44. - Coppia termoelettrica.

38. Pile termoelettriche e pirometri. — Riunendo in serie molte coppie termoelettriche di due metalli, riscaldando le giunzioni di numero pari e tenendo fredde quelle di numeri dispari si ottiene una batteria o pila termoelettrica. I metalli più impiegati per fare le pile termoelettriche sono il

bismuto e l'antimonio perchè questi metalli danno fra loro la f. e. m. massima.

Le pile e le coppie termoelettriche non sono impiegate praticamente per generare dell'elettricità perchè il loro rendimento è molto basso. Si adoperano invece come rivelatori e misuratori di temperatura.

Una delle pile più conosciute è quella Nobili-Belloni ed è formata da coppie bismuto-antimonio piccolissime riunite a zig-zag (Fig. 45).

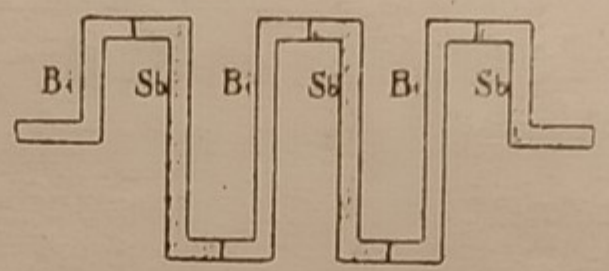


Fig. 45. - Schema di pila termoelettrica.

Le piccole asticine sono saldate fra loro alle estremità e tenute isolate da un mastice isolante. Le diverse serie di coppie a zig-zag sono riunite in un blocchetto di pochi centimetri di lato in modo che tutte le giunzioni pari si trovano sopra una faccia del blocchetto e tutte quelle dispari sull'altro. Le estremità di tutte le coppie in serie vengono messe in comunicazione con un galvanometro. Con queste pile si possono rivelare le più piccole temperature di irraggiamento dei corpi, rivolgendo una faccia del blocchetto verso i corpi stessi.

Ma l'applicazione più importante delle coppie termoelettriche è data dai *pirometri* o *misuratori di alte temperature*. Questi pirometri sono impiegati nelle fabbriche di porcellane, di vetro, di materiali refrattari, nella metallurgia, ecc. per misurare le alte temperature dei forni.

Le coppie termoelettriche per pirometri sono formate dalla saldatura di due metalli o leghe inossidabili e difficilmente fusibili. Si impiegano ad esempio fili di platino iridio e platino, platino e platino-rodio (90 Pt e 10 Rh). Quest'ultima coppia detta di Chatelier dà:

1000°	1200°	1300°	1400°	1500°	di temperatura
9,47	11,8	13	14,1	15,3	millivolt

Per formare un pirometro si mettono i due fili saldati in un tubo protettore di materiale infusibile o refrattario; le estremità dei fili si attaccano ad un galvanometro il quale ge-

neralmente porta una graduazione in gradi centigradi invece che in millivolt.

I metalli meno fusibili sono: Tungsteno 2900°; Iridio 2300°; Rodio 1970°; Platino 1745°. Il tungsteno intorno ai 1000° si ossida rapidamente nell'aria e brucia; il rodio si comporta ugualmente a temperatura poco superiore; l'iridio non si lascia trafilare in diametri piccoli. Il platino comincia a volatilizzare a 1200°. Si prestano invece ottimamente le leghe: platino--iridio (65 P*t*; 35 I*r*) per temperature fino a 1850°; platino-rodio (90 P*t*, 10 R*h*).

39. Elettrolisi. — Fino a questo punto noi abbiamo esaminato i fenomeni che si compiono nei corpi solidi, specialmente metallici, al passaggio della corrente. Vogliamo ora mettere in evidenza quanto si riferisce ai corpi liquidi.

I liquidi si dividono come i solidi in conduttori ed in coibenti; sono conduttori gli acidi, le basi, le soluzioni di acidi e di sali inorganici. Altri liquidi invece sono refrattari al passaggio della corrente come ad esempio l'acqua chimicamente pura, le soluzioni di zucchero, glicerina, destrina, l'alcool, l'etere, la benzina, gli olii, ecc. ed in generale tutti i liquidi organici. Anche i metalloidi chimicamente puri e loro miscele sono coibenti. Bastano però talvolta delle tracce estremamente piccole di acidi o sali inorganici per rendere conduttori dei liquidi coibenti. Tale è il comportamento dell'acqua. In ordine di conduttività si presentano gli acidi e loro soluzioni (solforico, cloridrico, nitrico, ecc.); poi le soluzioni di sali caustici (sali di soda, potassa, ecc.); infine le soluzioni dei sali metallici.

Quando una corrente continua attraversa un liquido conduttore (sia in soluzione che fuso) essa non solo produce un riscaldamento per effetto Joule, ma provoca una decomposizione del liquido e delle reazioni chimiche con la formazione di prodotti aventi in sè maggior energia chimica molecolare. Tale fenomeno si dice *elettrolisi*.

L'elettrolisi quindi riguarda una *trasformazione di energia elettrica in energia chimica o molecolare.*

Esiste anche il fenomeno contrario cioè: se si provocano reazioni chimiche in determinate condizioni dentro a dei liquidi si può ottenere della corrente elettrica. Tale è il fe--

nomeno che si compie nelle pile. In questo caso si ha *trasformazione di energia molecolare dei corpi in energia elettrica.*

In ogni apparecchio elettrolitico o di decomposizione di una liquido (sciolto o fuso) per comunicare la corrente si immergono nel liquido due *elettrodi* che devono essere corpi conduttori solidi. Si dice *anodo* l'elettrodo positivo (+) si dice *catodo* l'elettrodo negativo (—). Il liquido si dice *elettrolito; ioni* gli elementi decomposti.

ESPERIENZE: 1.° In un bicchiere di vetro contenente una soluzione allungata di acqua acidulata si immergono due elettrodi di platino o di piombo sotto forma di fili o laminette e si mettono in comunicazione con due o tre elementi di pile. Si osserverà subito formazione di ossigeno al polo + ed idrogeno al polo —.

Raccogliendo i gaz mediante delle campanelle di vetro si osserva che il volume dell'idrogeno è doppio dell'ossigeno. Tale apparecchio decompositore dell'acqua si dice voltametro. (Fig. 46-47).

2.° Pure in un recipiente di vetro riempito di una soluzione di un sale di rame, di zinco, di nichel, di argento, ecc. si provochi l'elettrolisi immergendo due elettrodi metallici sotto forma di lamine ed impiegando un paio di pile o di accumulatori. Si osserverà che al polo negativo si deposita il metallo formante parte della soluzione, mentre il resto del sale (acido) si concentra intorno al positivo corrodendolo.

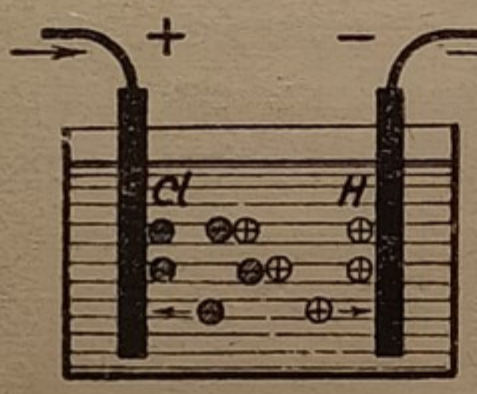


Fig. 46. - Voltametro semplice con soluzione di acido cloridrico.

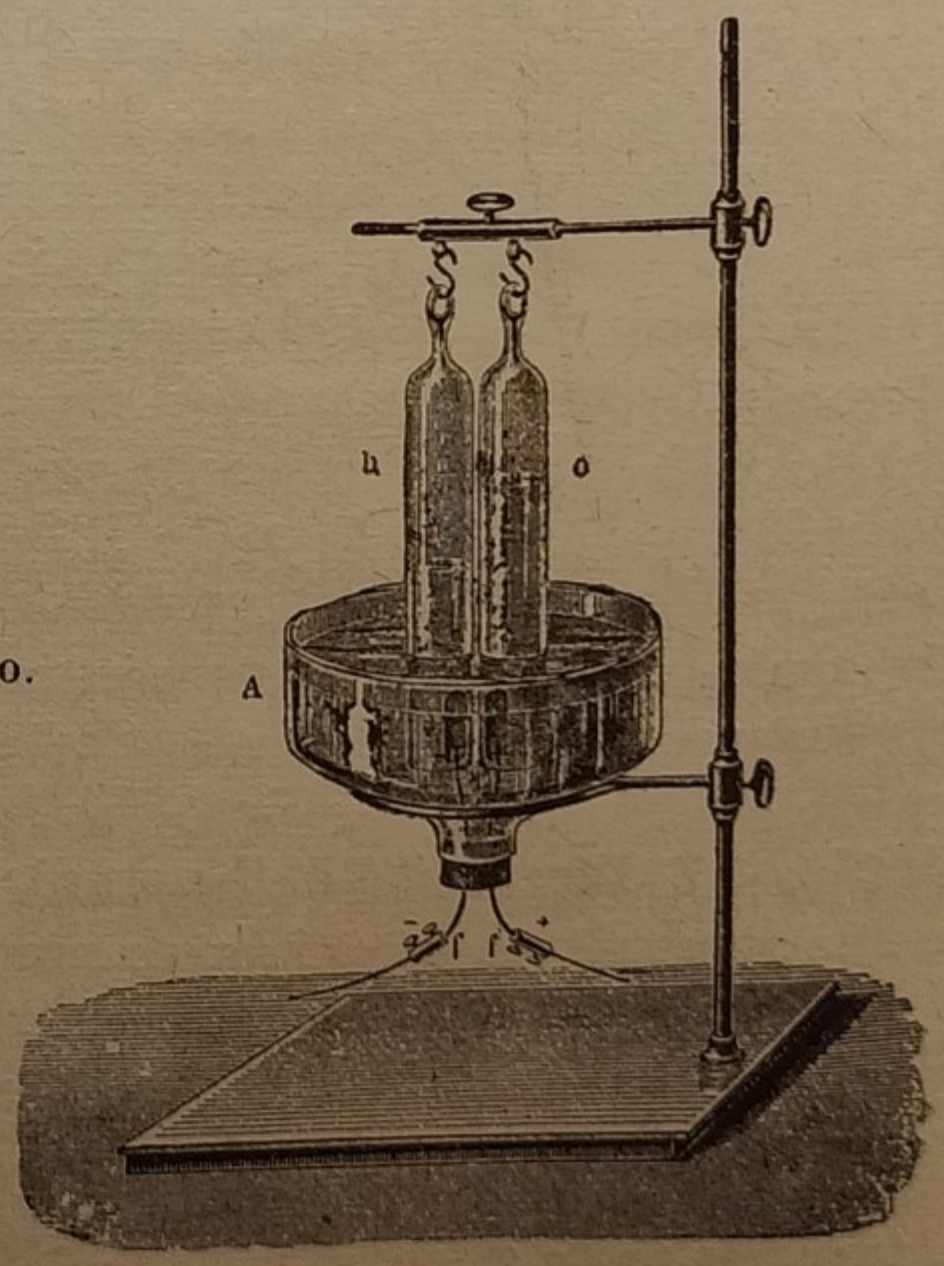


Fig. 47. - Voltametro a gaz.

Da queste ed altre esperienze si deduce che i prodotti decomposti si separano presso o sugli elettrodi e che i metalli si portano sempre sul catodo ed il resto del sale sull'anodo. L'idrogeno si comporta come un metallo e si porta al catodo; l'ossigeno all'anodo.

40. Reazioni secondarie nell'elettrolisi. — Non sempre l'elettrolisi porta a depositare sui due elettrodi gli elementi decomposti che formano, associati, l'elettrolito. Più spesso anzi succede che gli elementi decomposti entrano in combinazione o cogli elettrodi o coll'acqua che fa da solvente. Tali reazioni chimiche, che si compiono indirettamente a spese dell'elettrolisi, si dicono *reazioni secondarie*.

Per esempio elettrolizzando una soluzione di sale di cucina (cloruro di sodio *Cl Na*) il cloro si porta all'anodo e il sodio al catodo. Se l'anodo è inattaccabile dal cloro allora esso si svolge, ma se è attaccabile l'anodo passa allo stato di cloruro e si scioglie. Il sodio che si porta al catodo non si deposita, ma combinandosi coll'acqua forma della soda caustica (ossido idrato di sodio) e resta in libertà dell'idrogeno che si svolge liberamente. Per trattenere il sodio si impiega un catodo formato da mercurio, poichè questo scioglie rapidamente il sodio e lo sottrae momentaneamente dall'azione dell'acqua.

In generale elettrolizzando soluzioni acquose di sali od acidi (per esempio solfati o acido solforico) con metalli attaccabili il radicale dell'acido (per esempio SO4) si porta al polo +, intacca l'anodo e lo scioglie. Ma se l'anodo è inattaccabile il radicale decompone l'acqua, formando l'acido idrato e lascia in libertà l'ossigeno. Dalla parte del catodo il metallo si deposita solo se non è attaccabile dall'acqua. Ma se il metallo separato è attaccabile (sodio, potassio, litio, calcio, magnesio, ecc.) al catodo si svolge l'idrogeno residuo della decomposizione dell'acqua e rimane intorno al catodo dell'ossido idrato. L'acido intorno all'anodo e l'ossido idrato intorno al catodo si ricombinano ed il risultato finale è una concentrazione del liquido. Così si comportano tutti i sali dei metalli alcalini e alcalino-terrosi.

Chimicamente l'elettrolisi di un sale caustico, per esempio del solfato di potassio, si esprime colle seguenti equazioni chimiche:

$$K_2SO_4 = K_2 + SO_4$$

$$\text{(Catodo)}\quad 2\,K_2 + 4\,H_2O = 4\,KOH + 2\,H_2$$

$$\text{(Anodo)}\quad 2\,SO_4 + 2\,H_2O = 2\,H_2SO_4 + O_2$$

La prima equazione esprime la vera azione elettrolitica, le altre due le reazioni chimiche secondarie che si compiono all'anodo e al catodo, In ogni caso le reazioni chimiche secondarie complicano molto i fenomeni elettrolitici e per riuscire a dati processi elettrolitici bisogna ricorrere a mezzi indiretti che solo un profondo studio delle affinità chimiche fra i corpi può insegnare.

La decomposizione dei sali alcalini si può dimostrare in un voltametro a U. (Fig. 48).

Elettrolizzando una soluzione neutra di bicarbonato, solfato, cloruro alcalino ed impiegando due lamine di platino o due asticine di carbone si osserva che mettendo una soluzione di tornasole dove si svolge ossigeno la tintura volge al rosso, mentre dall'altra parte rimane azzurra.

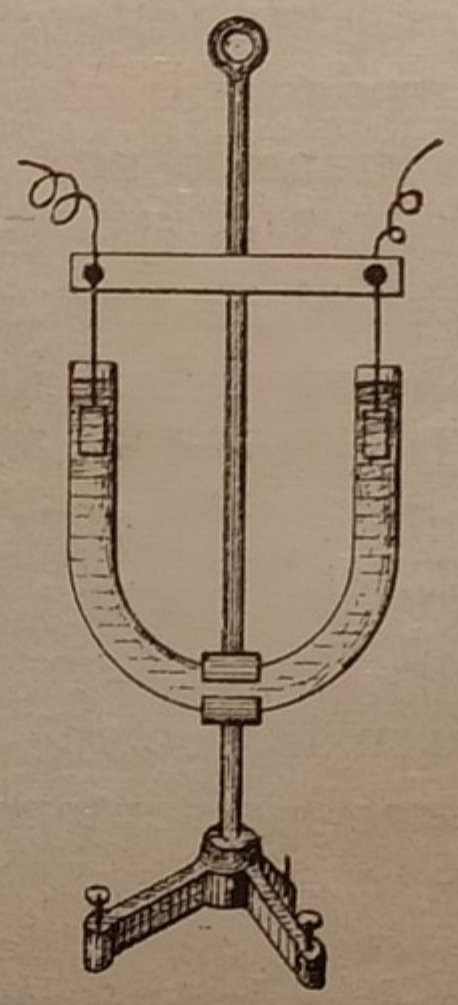


Fig. 48. - Apparecchio per dimostrare l'elettrolisi.

41. Teoria dell'elettrolisi. — Secondo le teorie emesse dai fisici Clausius e Arrehnius le molecole dei sali od acidi in soluzione sarebbero formate da due aggruppamenti e cioè: 1.° di atomi; 2.° di residui di altri atomi o molecole; gli uni sono caricati di elettricità positiva, gli altri di elettricità negativa. Ovverosia: gli uni hanno in sè un eccesso di elettroni (elementi negativi costituenti l'elettricità negativa) gli altri una deficenza. Nelle soluzioni si trovano anche delle molecole neutre formate dalla riunione dei due aggruppamenti con cariche uguali e degli atomi e dei residui di molecole dissociate aventi cariche opposte.

Le leggi della chimica e dell'elettrolisi stanno a dimostrare che gli atomi metallici sono caricati positivamente; tutti gli altri atomi o residui di molecole negativamente.

Tutti sono in movimento disordinato a zig-zag e l'energia equivalente sarebbe rappresentata dal calore. Gli atomi e le molecole dissociate si chiamano *ioni*.

Ogni atomo monovalente (H, C*l*, B*r*, K, N*a*, A*g*, ecc.) possiede una carica uguale per tutti; gli atomi bivalenti (C*o*, N*i*, O, S, F*e*, ecc.) e trivalenti (F*e*, C*r*, M*n*, ecc. posseggono cariche doppie e triple dei manovalenti.

Due elettrodi immersi in una soluzione rappresentano due corpi carichi di elettricità opposta; allora queste cariche esercitando un'azione di attrazione sugli ioni determinerebbero nella massa dell'elettrolito una direzione ai loro movimenti: gli atomi positivi (metalli) verrebbero attratte dal catodo (—); i residui negativi all'anodo (+). Venendo a contatto cogli elettrodi tanto gli uni che gli altri cederebbero la loro carica. Gli ioni quindi farebbero da trasportatori delle cariche; la corrente negli elettroliti sarebbe quindi non un flusso di elettroni ma un trasporto di essi dovuto a ioni.

42. Leggi dell'elettrolisi. — La prima legge detta di Faraday stabilisce:

La quantità di elettrolito decomposto o di ioni separati, è proporzionale alla quantità di corrente che ha attraversato l'apparecchio elettrolitico. In altre parole per ogni *coulomb* di elettricità corrisponde un determinato peso di elemento decomposto sopra un elettrodo e sopra l'altro.

La seconda legge dice:

I pesi degli elementi decomposti sui due elettrodi stanno fra loro come gli equivalenti chimici,

Gli equivalenti chimici sono i rapporti in peso secondo cui i corpi semplici si combinano ritenendo 1 il peso dell'idrogeno.

Rammentiamo una delle principali leggi della chimica: i corpi semplici si combinano fra loro non in proporzione a casaccio ma sempre secondo determinati rapporti in peso semplici o multipli. Così un peso determinato di idrogeno (p. e. 1 gr.) si combina solo con 8 pesi di ossigeno, 16 di zolfo, 35,37 di cloro per formare dei composti ben definiti. A loro volta 8 parti di ossigeno si combinano 35,37 di cloro con 23 di so-

dio, 39 di potassio, 65,4 di oro, 107,6 di argento, ecc. Questi numeri 1, 8, 16, 35, 37, 23, 39 ecc. si dicono equivalenti chimici.

Vi sono dei corpi come il ferro, il rame, il mercurio, lo stagno, l'azoto, il carbonio, ecc. che possono entrare in combinazione con altri (per esempio col cloro, collo zolfo, coll'idrogeno, coll'ossigeno) in proporzioni multiple. Per esempio l'ossigeno forma col rame degli ossidi nella proporzione di 8 a 31,5 e di 8 a 63. L'ossigeno può formare 5 composti diversi coll'azoto nel rapporto 14 a 8, : 16 : 24 : 32 : 40. Il manganese fa pure coll'ossigeno 5 composti (ossidi). Se qui riteniamo 8 l'equivalente dell'ossigeno, l'azoto può avere per equivalente chimico nei diversi composti: 14 - 7 - 4,66 - 3,5 - 2,8.

In riguardo alla prima legge dell'elettrolisi si dice *equivalente elettrochimico* di un corpo il peso in gr. liberato da 1 coulomb. Siccome scomponendo l'acqua si ha per ogni coulomb gr. 0,00001038 di idrogeno che è stato preso come unità degli equivalenti chimici così si avranno gli *equivalenti elettrochimici* in grammi dei diversi corpi moltiplicando 0,00001038 per gli equivalenti chimici che i corpi hanno in quel determinato composto.

Perciò chiamando P il peso in grammi di un corpo semplice separato avente l'equivalente chimico *e* nel composto; I l'intensità in ampère; Q la quantità di corrente in coulomb: *t* il tempo in minuti secondi di durata dell'intensità I si ha:

$$P = 0{,}00001038 \cdot e \cdot Q = 0{,}00001038 \cdot e \cdot I \cdot t$$

La tabella 10 contiene gli equivalenti chimici delle principali sostanze semplici.

ESERCIZI. — 1.° Quanti grammi di argento possono essere depositati da una corrente di 20 Amp. in un'ora?

R. Essendo 107,66 l'equivalente chimico dell'argento ed essendo ogni ampère ora 3600 coulomb, il peso dell'argento depositato sarà:

$$20 \times 3600 \times 0{,}00001038 \times 107{,}66 = 80{,}4\ gr.$$

2.° Supponiamo che una corrente attraversi molti bagni elettrolitici formati da soluzioni di sali od acidi differenti, e che i bagni si trovino in serie. Secondo la prima legge di Faraday si avrà che i metalli si depositeranno in proporzione dei rispettivi equivalenti chimici. Si domanda quanti coulomb saranno necessari per depositare tanti grammi di ciascun metallo quanti sono i rispettivi equivalenti chimici.

R. I coulomb necessari saranno uguali per tutti i metalli e si otterranno dividendo 1 grammo per l'equivalente elettrochimico. Così se un

coulomb sviluppa 0,00001038 gr. di idrogeno, per ottenere un grammo di idrogeno (e quindi tanti grammi delle altre sostanze pari al loro equivalente chimico) sarà necessaria una quantità di corrente di:

$$\frac{1}{0{,}00001038} = 96500 \text{ coulomb (ossia } 26{,}8 \text{ Ampère-ora}$$

3. Un voltametro a bagno d'argento ha depositato in 30' gr. 0,320 di argento. Qual'è l'intensità media della corrente passata nel bagno?

R. Per depositare mmg. 320 di argento occorrono, secondo la tabella n.° 10,

$$320 : 1{,}118 = 286 \text{ coulomb}$$

Essendo un coulomb equivalente ad un ampère al minuto secondo, la intensità della corrente in 30' ossia 1800" sarà:

$$286 : 1800 = 0{,}159 \text{ amp.}$$

TABELLA N. 10 - Equivalenti chimici ed elettrochimici

CORPI	Valenze	Peso Atomico	Equival. chimico	Equival. elettrochim. mmg. per coulomb	Coulomb per 1 grammo	Gr. liberati da un Amp.-ora
Idrogeno	1	1	1	0,010587	96318	0,03739
Cloro	1	35,37	35,37	0,367	27207	1,322
Ossigeno	2	15,96	7,98	0,08288	12053	0,298
Potassio	1	39,04	39,04	0,4055	2468	1,460
Sodio	1	22,29	22,99	0,2389	4190	0,859
Alluminio . . .	3	27,3	9,1	0,0945	10585	0,340
Oro	3	196,2	65,4	0,679	1474	2,445
Argento	1	107,66	107,66	1,118	894	4,026
Rame (sali ramici)	2	63	31,5	0,328	3044	1,178
Rame (sali ramosi)	1	63	63	0,657	1522	2,355
Ferro (sali ferrici)	3	55,9	18,64	0,1936	5161	0,697
Ferro (sali ferrosi)	2	55,9	27,95	0,2906	3461	1,046
Nichel	2	58,6	29,3	0,304	3288	1,095
Zinco	2	64,9	32,45	0,337	2968	1,213
Piombo	2	206,4	103,2	1,08288	933	3,859

ESERCITAZIONI DA RISOLVERE:

1. Quanti ampèr-ora occorrono per ottenere un chilogramma di ferro per via elettrolitica da un sale ferrico o da un sale ferroso?

2. Che spessore ha lo strato di nichel sopra una superficie di 8 decimetri quadrati di un oggetto nichelato per via elettrolitica con una

corrente di 6 amp. in mezz'ora e sapendo che un centimetro cubo di nichel pesa gr. 8,9?

3. Quanto tempo è necessario per depositare 100 gr. di argento o di zinco o di rame con una corrente di 6 amp.?

4. Quanti ampèr-ora occorrono per avere una produzione di 10 mc. di ossigeno all'ora mediante l'elettrolisi; e quanti mc. di idrogeno si ottengono? Il rendimento degli apparecchi elettrolitici si presume di 0,8.

43. Tensione minima necessaria per una decomposizione elettrolitica. — In un processo elettrolitico si consuma evidentemente della energia elettrica rappresentata dal numero dei coulomb od ampère-secondo per la forza elettromotrice esistente fra gli elettrodi supposta costante in un dato tempo; ossia:

Joule = Coulomb × volt = Amp. × volt × tempo in 1"

Il lavoro elettrico consumato, per la grande legge della conservazione dell'energia, dovrà riapparire trasformato in altra forma. Infatti detto lavoro si compone di due parti: 1.° dal *lavoro chimico* per dissociare i composti ed aumentare la loro energia cinetica molecolare; 2.° del *lavoro termico* o per effetto Joule che è generale per tutti i conduttori.

Ma il lavoro chimico in una reazione chimica si esprime dalla differenza delle *calorie di combinazione* dei prodotti prima e dopo la reazione; la differenza corrisponde al lavoro assorbito o reso.

Per il nostro caso riferiamo le calorie di combinazione di un composto al peso in grammi del metallo separato rappresentato dal suo equivalente chimico. Dall'esempio esposto al paragrafo precedente si ricava che per separare dai composti un peso in gr. espresso dall'equivalente chimico del metallo si richiede una quantità uguale di corrente per tutti i metalli (ed in generale per tutti gli ioni decomposti) ed espressa da 965000 coulomb.

Se E sono i volt applicati; C le sopradette calorie-grammo per un numero di grammi pari all'equivalente chimico; sapendo che una caloria grammo equivale a 4,166 Joule (parag. 32) ed equiparando il lavoro elettrico al lavoro chimico e trascurando per un momento il lavoro perduto per effetto Joule avremo:

$$96500 \times E = C \times 4{,}166$$

da cui si cava:

$$E = \frac{C \times 4{,}166}{96500}$$

ossia:

$$E = \frac{C}{23200}$$

formola che serve a calcollare la f. e. m. minima necessaria per attuare una data decomposizione chimica.

La f. e. m. effettiva è in generale maggiore del valore E dato dalla formola perchè come abbiam detto, una parte della f. e. m. deve essere spesa per vincere la resistenza ohmica del bagno (effetto Joule). Si riscontra infatti in tutte le operazioni elettrolitiche un aumento di temperatura. Inoltre i gaz idrogeno ed ossigeno che più o meno si forma sugli elettrodi creano per loro conto delle forze elettromotrici contrarie (f. e. m. di polarizzazione).

Nei manuali di chimica si possono rintracciare le calorie di formazione dei composti e ricavare dalle reazioni chimiche il valore di C:

ESEMPI. — 1.° Le calorie grammo di combinazione che si svolgono quando l'idrogeno si unisce all'ossigeno per formare un equivalente di acqua sono 34500. La f. e. m. minima necessaria per la decomposizione sarà:

$$E = \frac{34500}{23200} = 1{,}45$$

2. Calcolare la f. e. m. minima per decomporre del solfato di rame. Per ossidare un equivalente in grammi di rame occorrono 20.200 calorie.
Per trasformare l'ossido in solfato occorrono 9.200 calorie.

Totale 29400

La f. e. m. minima per decomporre il solfato sarà:

$$\frac{29400}{23200} = 1{,}27$$

Questo risultato è applicabile al caso di elettrolisi provocata con due elettrodi di platino; ma se all'anodo si mette una lastra di rame allora il lavoro di separazione del metallo al polo — è compensato dal lavoro reso dalla soluzione del

metallo nell'acido solforico nascente al polo positivo. Quindi la tensione E sarebbe nulla.

Da questi esempi si vede che occorre conoscere bene le reazioni che si compiono ai due elettrodi per ricavare il bilancio delle calorie.

44. Applicazioni dell'elettrolisi. — Le applicazioni della elettrolisi sono svariatissime e possono raggrupparsi:

1.° Deposizioni di metalli sopra altri metalli od oggetti metallizzati. Appartengono a questa classe la galvanoplastica, la ramatura, la nichelatura, ottonatura, doratura e argentatura per via galvanica, l'*elettrotipia* per la riproduzione delle incisioni su legno o metalli.

2.° Estrazione industriale dei metalli dai minerali e loro raffinazione. Appartengono a questa categoria: l'estrazione del rame; raffinazione del rame greggio e fabbricazione del rame elettrolitico; l'estrazione dell'oro, dell'alluminio, stagno, arsenico, antimonio, magnesio, ecc.; la fabbricazione dei tubi e delle lamiere di ferro puro. Queste applicazioni si possono chiamare di *elettro-metallurgia*.

3.° Preparazione di composti industriali, per esempio: fabbricazione della soda caustica, del cloro, dell'ossigeno ed idrogeno, del clorato di potassa, ozono, ecc.

4.° Applicazioni di laboratorio chimico: determinazione dei composti di alcune soluzioni inorganiche, del tenore di metalli nei sali e minerali; controllo della quantità di corrente e dell'intensità di corrente impiegata in un determinato processo.

45. Pile. — Le pile voltaiche sono dei generatori di energia elettrica sotto forma di corrente continua nelle quali si approfitta dell'energia molecolare che si svolge in determinate reazioni chimiche. Come è noto in chimica vi sono reazioni in cui da un composto meno ricco di energia molecolare si passa a dei composti più ricchi (reazioni endotermiche); in altre invece succede il contrario (reazioni esotermiche). I fenomeni elettrolitici puramente detti appartengono alla prima categoria; le reazioni nelle pile appartengono alla seconda.

Una pila voltaica è formata da due metalli, o da un metallo e da un'asta di carbone, immersi in una soluzione acida

o salina colla quale i due metalli od un metallo può entrare in combinazione (cioè provocare una reazione chimica) Alle estremità dei due elettrodi si rivela una differenza di potenziale e se il circuito esterno viene chiuso si ottiene una corrente continua.

Nelle pile ordinarie si impiega come elettrodo negativo lo zinco; come elettrodo positivo una lastra od asta di rame o di carbone grafitico o di storta. Lo zinco è il metallo attaccabile alla soluzione; esso perciò si scioglie trasformandosi in un sale di zinco.

La direzione della corrente è dal polo + al polo — esternamente alla pila e viceversa nell'interno.

La f. e. m. a circuito aperto delle pile è indipendente dalla grandezza degli elettrodi, ma dipende solo dal bilancio delle calorie molecolari (parag. 43) e cioè dalle reazioni chimiche che si compiono. Ma se gli elettrodi sono più grandi, tanto minore sarà la resistenza interna ohmica; quindi tanto maggiore sarà la intensità della corrente a circuito chiuso, oppure tanto più grande sarà la durata della pila.

46. Polarizzazione delle pile e depolarizzanti. — Consideriamo un elemento di pila o *coppia voltaica* formata da un bicchiere contenente dell'acqua acidulata con acido solforico o cloridrico e due elettrodi immersi uno di carbone e uno di zinco. La corrente circolerà internamente dal polo — al polo + e come in qualsiasi *voltametro* (paragrafo 39) dell'idrogeno si svilupperà nel senso della corrente, cioè sull'elettrodo positivo. (Fig. 49).

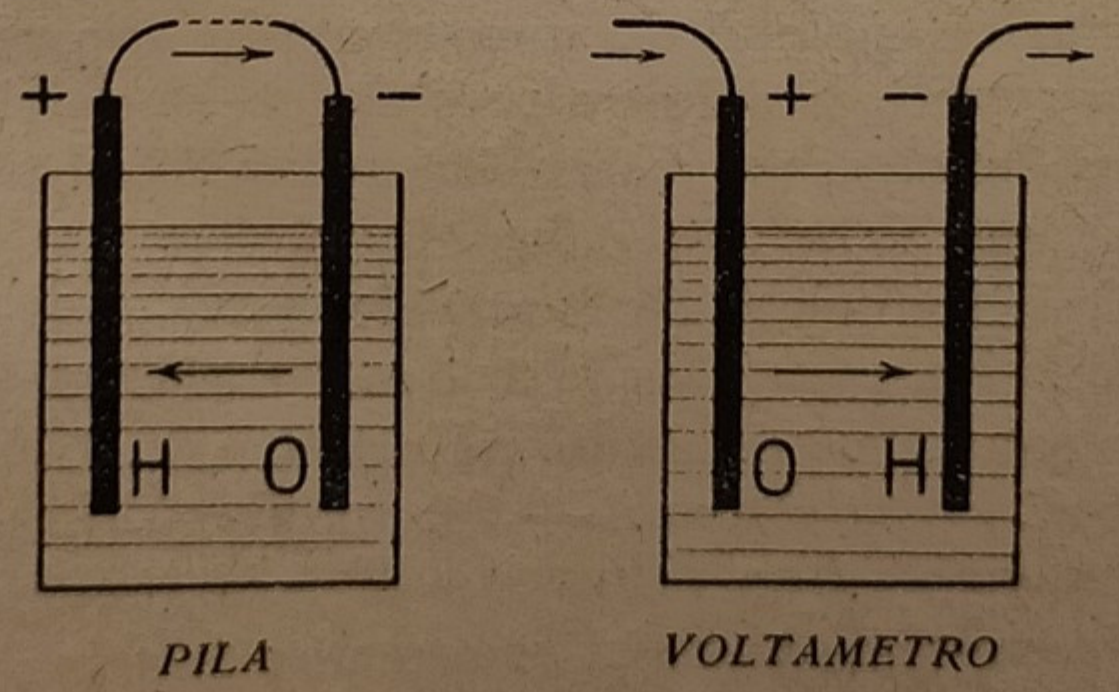


Fig. 49 - Differenza fra una pila ed un voltametro e origine della polarizzaziene

Si noti che pila e voltametro hanno la stessa costruzione, solo che nel primo caso la corrente va dal — al + internamente all'apparecchio; nel secondo caso va in senso contrario perchè forzata da una f. e. m. più elevata. L'idrogeno formando delle bollicine sul carbone oppone una resistenza al passaggio della corrente; inoltre questo gaz crea una f. e. m. contraria alla f. e. m. suscitata dallo zinco in modo che dopo un breve tempo la pila si esaurisce. Tale fenomeno si dice *polarizzazione.*

ESPERIENZA. — Si prenda un bicchiere di acqua acidulata e due lamine o di rame o di piombo o anche di carbone immerse. Si mettano le lamine in comunicazione con una pila e si noti la direzione della corrente. Dopo un certo tempo la corrente diminuisce; si interrompa la corrente e si mettano le lamine in comunicazione con un galvanometro o con un milliampèrometro Weston. Si osserverà che si forma una f. e. m. contraria a quella di pila.

Per ovviare a questo inconveniente si adoperano nelle pile, intorno all'elettrodo positivo, dei *depolarizzanti* che sono dei liquidi o composti i quali possono entrare facilmente in combinazione coll'idrogeno ed assorbirlo.

I depolarizzanti più impiegati sono il solfato di rame, i cloruri metallici, l'acido nitrico, l'acido cromico, il perossido di manganese ed in generale tutti i sali o acidi molto ricchi di ossigeno.

47. Principali tipi di pile:

1.° *Pila di Volta a colonna.* — E' una pila che ha soltanto un valore storico, poichè da questo umile apparecchio partirono i primi spunti, le prime ricerche dell'elettricità dinamica, che andarono mano mano ampliandosi fino ad arrivare nelle applicazioni agli impianti colossali moderni.

La pila è composta di tanti elementi zinco--rame sotto forma di dischi separati da altrettanti dischi di feltro imbevuti di una soluzione di acido solforico.

2.° *Pila di Volta a tazze.* — Si compone di tanti bicchieri di vetro contenenti una soluzione di acido solforico al 20 % circa. In ciascun bicchiere si mette una lastrina di rame ed una di zinco. Anche questa pila per effetto della polarizzazione non è costante.

3.° *Pila Daniell.* — In un vaso di vetro (Fig. 50) vi è un altro di porcellana porosa. Internamente a questo vaso si

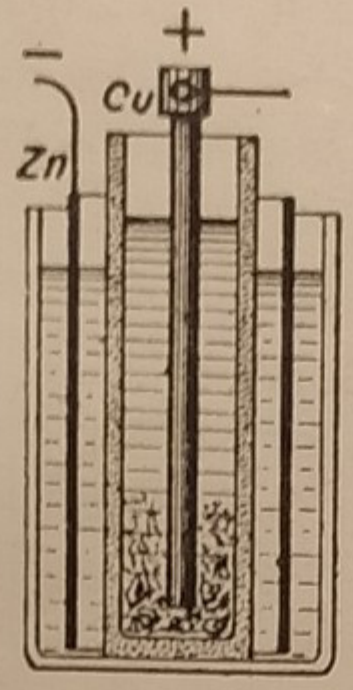


Fig. 50 - Pila Daniell

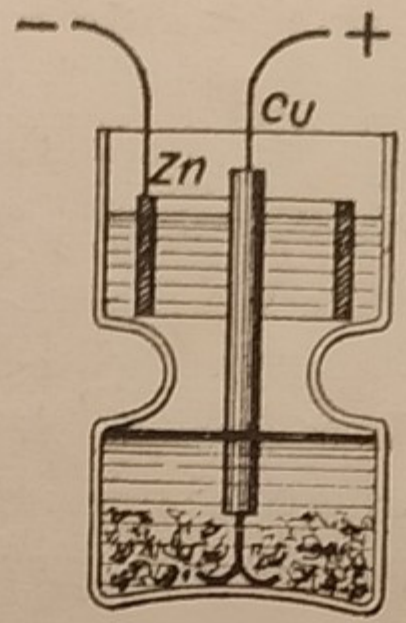


Fig. 51 - Pila italiana

mette un'asta o lamina di rame ed una soluzione concentrata di solfato di rame. Nell'intercapedine fra vaso di vetro e vaso poroso si mette una soluzione di acido solforico ed una lastra di zinco.

4.° *Pila italiana* (Fig. 51). — E' una derivazione della pila Daniell ma priva di vaso poroso. Essa è formata di un vaso di vetro alto 20-22 cent. largo 10 cent. con una strozzatura di 6-7 centimetri nel mezzo.

La strozzatura sostiene una lastra di zinco piegata a cilindro ed è riempita di acqua acidulata o di una soluzione semisatura di solfato di zinco. La parte inferiore del vaso contiene una soluzione concentrata di solfato di rame mantenuta satura coll'aggiunta di cristalli di solfato. L'elettrodo positivo è formato da un bastoncino di rame che attraversando il liquido superiore si appoggia sul fondo del vaso. Nella parte media il bastoncino è protetto da un tubetto di piombo o di gomma. Le due soluzioni: l'una trasparente e l'altra bleu carico si mantengono separate perchè la densità della prima è inferiore all'altra.

La pila italiana è quella adottata dalla Amministrazione telegrafica italiana. Ha una f. e. m. di 1 volt ed una resistenza di 8 a 10 ohm.

Durante il funzionamento il solfato di rame viene decomposto dall'idrogeno che si forma al polo positivo; il rame si deposita in forma di grumi sull'asticina e l'acido solforico

passando nel liquido superiore intacca lo zinco e lo scioglie con formazione di solfato di zinco. Ecco la reazione chimica:

$$\overset{-}{Zn} + H_2 SO_4 = Zn SO_4 + \overset{+}{H_2}$$
$$H_2 + Cu SO_4 = Cu + SO_4 H_2$$

Le pile impiegate presso le Amministrazioni telegrafiche estere sono tutte derivate dalla Daniell (Chaperon in Francia, Meidinger in Germania, ecc.) ma senza il vaso poroso di porcellana.

5.° *Pila Bunsen*. — La pila Bunsen è una pila da laboratorio perchè ha una f. e. m. grande (1,8 a 1,9 volt) ed una resistenza interna piccolissima ossia da 0,1 a 0,2 ohm. Può servire per brevi esperimenti in cui si richiede una grande intensità di corrente.

E' una pila a due liquidi con vaso di vetro esterno e vaso poroso interno.

Nell'intercapedine tra i due vasi si mette una soluzione al 20% di acido solforico ed un cilindro di lastra di zinco. Nell'interno del vaso poroso si mette dell'acido nitrico ed un blocco di carbone con morsetti.

Durante il funzionamento lo zinco si scioglie nell'acido solforico formando del solfato; l'idrogeno che si svolge al positivo riduce l'acido nitrico il quale passa allo stato di acido nitroso che si svolge sotto forma di un gaz giallo, nocivo alla respirazione. La reazione chimica è:

$$\overset{-}{Zn} + SO_4 H_2 = Zn SO_4 + \overset{+}{H_2}$$
$$H_2 + 2 Az O_3 H = 2 H_2 O + 2 Az O_2$$

6.° *Pila Grenet o al bicromato di potassa*. — E' una pila ad un sol liquido misto di eccitatore e di depolarizzante,

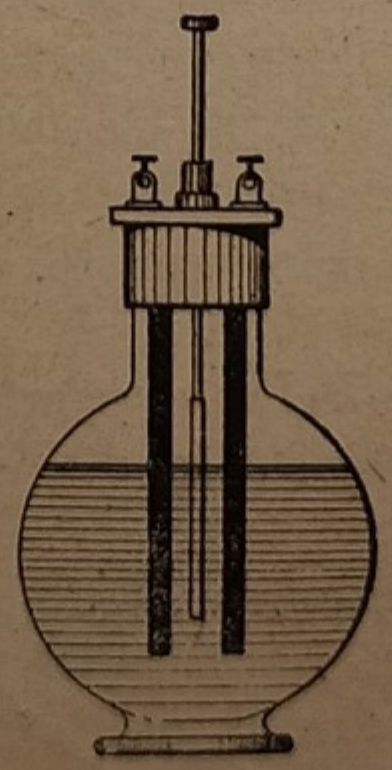


Fig. 52 . Pila Grenet

(fig. 52). Si compone di una bottiglia a collo largo contenente una soluzione di 16--20 parti di bicromato di potassa e soda e 37 parti di acido solforico. Due lastrine di carbone abbinate formano l'elettrodo positivo; una lastrina di zinco mobile fra i carboni forma il negativo.

L'aggiunta di acido solforico al bicromato dà origine ad una soluzione di solfato di potassa, soda e di acido cromico, forte ossidante e quindi depolarizzante energico. Durante il servizio lo zinco si scioglie con formazione di solfato di zinco e l'acido cromico si riduce per mezzo dell'idrogeno che si sviluppa al polo +. La f. e. m. è di 2 volt.

La pila Grenet è semplice perchè ad un sol liquido, economica, perchè lo zinco si tiene immerso nell'acido solo quando si adopera. Dà una forza elettromotrice di quasi 2 volt ed ha una limitata resistenza ohmica interna.

7.° *Pila Leclanchè.* — E' costituita da un vaso di vetro e di un vaso poroso. (Fig. 53). Nell'intercapedine si mette una

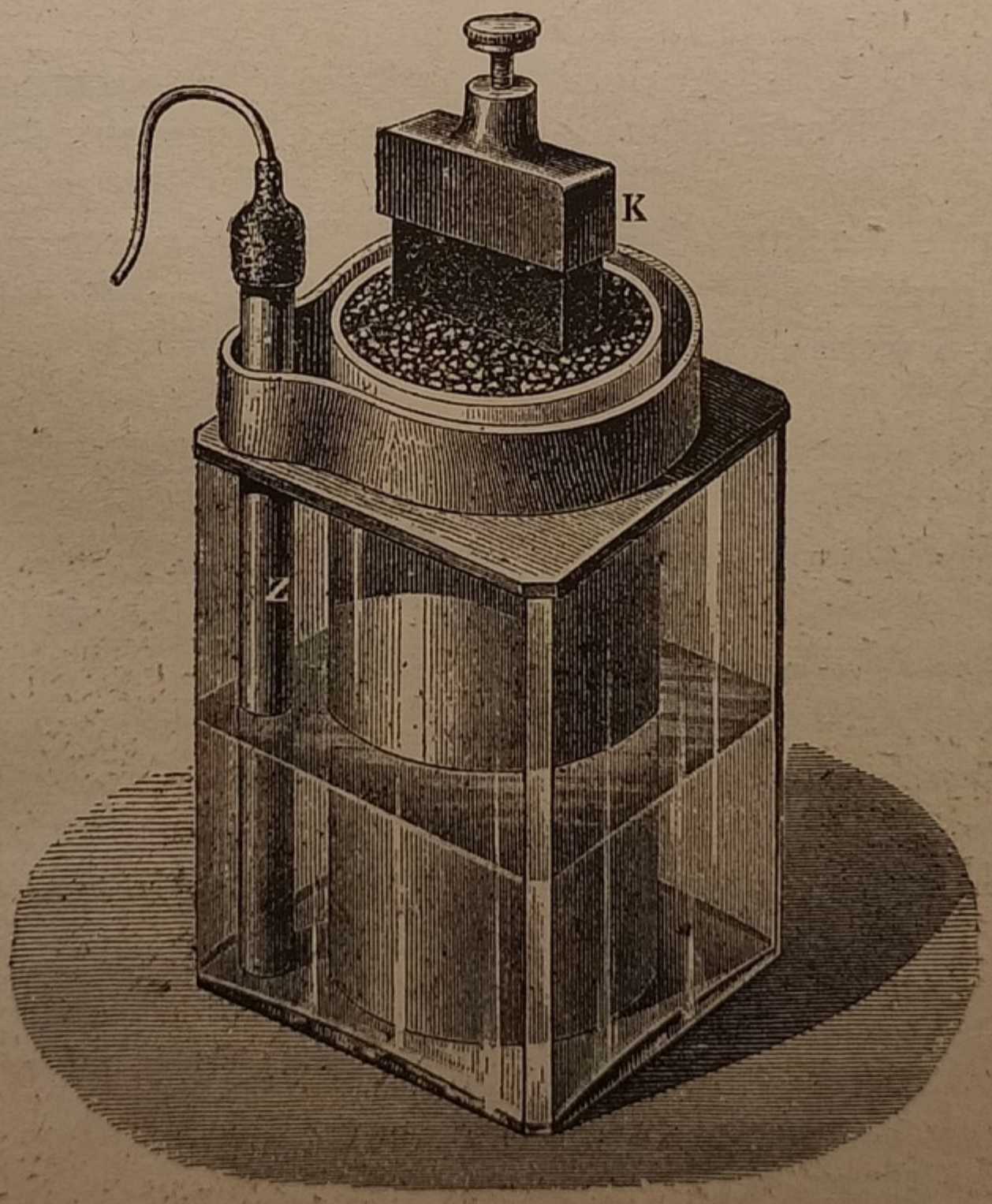


Fig. 53 - Pila Leclanchè.

soluzione satura di sale ammonico (cloruro ammonico) e una lastra di zinco (—). Nell'interno del vaso poroso si mette un prisma di carbone di storta (+), circondato da una miscela di perossido di manganese e graniglia di carbone.

E' una pila in cui lo zinco non si consuma quando non la si adopera; mentre in tutte le altre pile, che hanno lo zinco nella soluzione di acido solforico, lo zinco si corrode anche se la pila non è in funzione. Ha una f. e. m. limitata e precisamente da 1,4 a 1,5 volt ed una resistenza interna molto variabile (2 a 8 ohm). E' però una pila di grande durata, di facile manutenzione. Questa manutenzione si riduce all'aggiunta di acqua quando il livello del liquido si abbassa e di sale ammonico quando la tensione diminuisce.

L'equazione chimica corrispondente alle reazioni della pila Leclanchè sono:

$$Zn + 2\ Cl\ Az\ H_4 = Zn\ Cl_2 + 2\ Az\ H_3 + H_2$$
$$H_2 + 2\ Mn\ O_2 = Mn_2\ O_3 + H_2\ O$$

Vi sono delle reazioni secondarie che portano alla formazione di cloruro doppio di zinco e ammonico e di ossicloruro di Zn.

Le pile Leclanchè sono le più diffuse per campanelli e telefoni perchè adatte a fornire deboli correnti pur essendo di lunga durata e di poco costo.

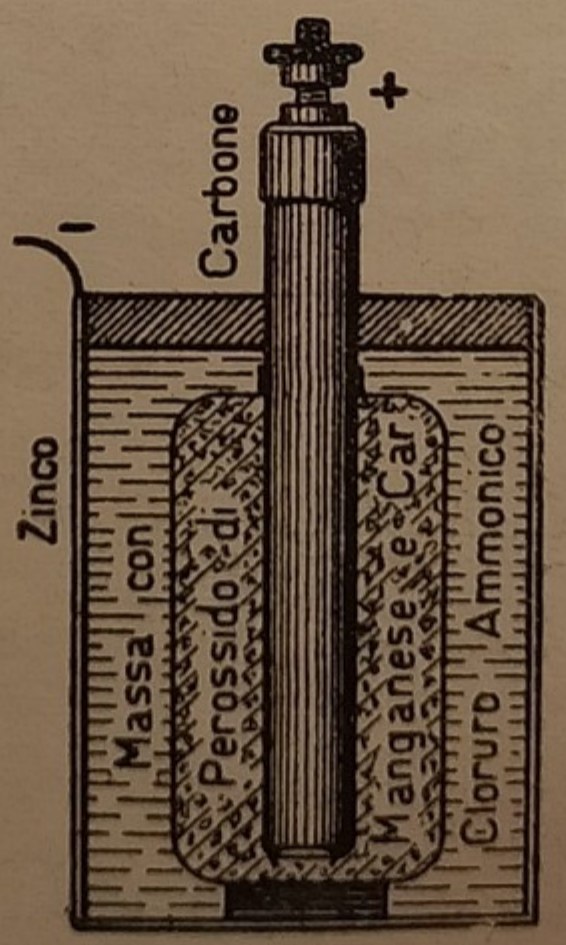


Fig. 54 - Pila a secco tipo Leclanchè.

8.° *Pile a secco.* — Le pile a secco (od a liquido immobilizzato) sono formate da un vaso tondo o quadro di zinco che forma il polo negativo). (Fig. 54). Internamente vi è un bastoncino o blocchetto di carbone serrato al centro di un sacchetto di tela contenente un agglomerato di perossido di manganese e graniglia fina di carbone grafitico o polvere di carbone di legno (brace). Prima di montare la pila si mette il sacchetto contenente il perossido per 24 ore in una soluzione concentrata di cloruro ammonico. Tra il sacchetto e il recipiente esterno si mettono delle sostanze porose inerti, capaci di assorbire una soluzione concentrata di cloruro ammonico o delle miscele di cloruro ammonico con cloruro di zinco, glicerina, cloruro di calcio, cloruro di magnesio che sono sostanze deliquescenti ovverosia capaci di trattenere l'umidità. Come sostanze porose si impiegano: pasta d'amido, polvere di pomice, segatura di legno, gesso, farine silicee, lana di vetro ecc. La pila poi si chiude con del catrame lasciando qualche forellino per la sfuggita di gaz e si fascia con carta catramata.

La f. e. m. è di 1,3 a 1,6 volt e la resistenza interna di pochi decimi di ohm. Le pile a secco hanno una durata variabilissima a seconda della loro costruzione più o meno accurata ed a seconda del regime di scarica. In generale quando sono rimaste lungamente in riposo perdono le loro proprietà e non dànno più corrente. Si possono talvolta ripristinare iniettando dell'acqua.

In ordine alla fabbricazione e manutenzione delle pile si osserva che essendo lo zinco il principale materiale che si consuma è bene che sia scelto per questi usi una qualità pura e che siano chimicamente puri anche i reagenti. Per le pile Daniell, Grenet, Leclanchè e Bunsen si consiglia di impiegare dello zinco amalgamato con mercurio (ciò che si ottiene sfregando la superficie dello zinco con mercurio per mezzo di una spazzola metallica). Lo zinco amalgamato gode le proprietà di non essere intaccato dall'acido quando non passa corrente.

48. Accoppiamento delle pile. — Le pile si accoppiano fra loro formando delle *batterie*:

1.° *in serie od in tensione* cioè mettendole in catena ed unendo il polo + dell'una col polo — della successiva. Agli

estremi della pila rimarranno un polo positivo ed uno negativo liberi ed ai quali si attacca il circuito esterno. (Fig. 55).

2.° *in derivazione od in quantità.* In questo caso tutti i poli positivi si uniscono ad un conduttore; tutti i poli negativi ad un altro conduttore. (Fig. 56).

Mettendo le pile in serie si sommano tutte le loro tensioni; disponendole in quantità si sommano le singole intensità.

Sieno: E la f. e. m. totale di una batteria di pile; I la intensità totale nel circuito esterno; *i* l'intensità di ciascuna pila (supposto che tutte le pile siano uguali); *e* la f. e. m.

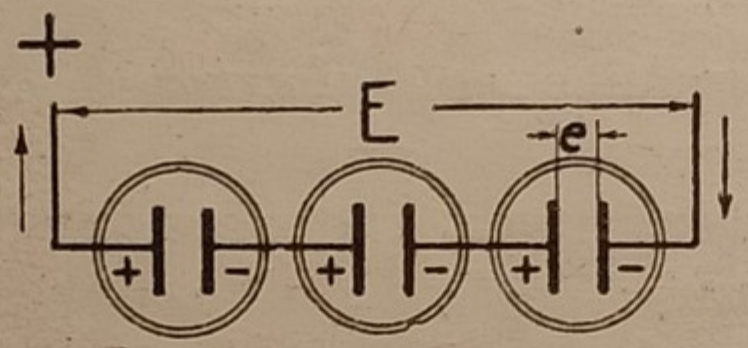


Fig. 55 - Pile in serie.

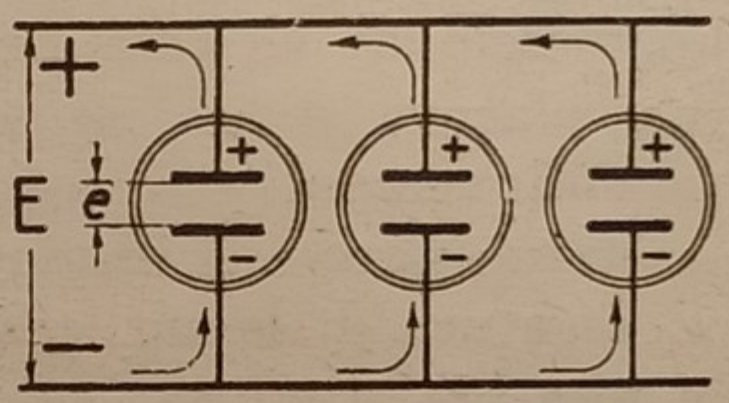


Fig. 56 - Pile in derivazione

in volt di ciascun elemento; *r* la resistenza interna di ciascun elemento; R la resistenza esterna o del circuito esterno inserita fra i capi della batteria, avremo:

1.° *Batteria di pile in serie*:

$$I = i \qquad E = n \times e$$

Applicando la legge di Ohm al circuito completo interno ed esterno:

$$I = \frac{n \times e}{R + r\,n}$$

2.° *Batterie di pile in quantità*:

$$I = n \times i \qquad E = e$$

ed anche:

$$I = \frac{e}{R + \frac{r}{n}}$$

Delle due disposizioni converrà quella in serie quando la resistenza esterna è grande in confronto di quella interna

della batteria e piccola la corrente (linee telegrafiche, telefoniche, segnalazioni). Converrà invece la disposizione in quantità quando la resistenza esterna è piccola e grande l'intensità desiderata.

Oltre ai due sistemi sopraindicati vi sono dei sistemi misti di accoppiamenti e precisamente:

1.° *Accoppiamento in serie parallele* come è indicato dalla figura 57.

Il numero degli elementi di ciascun ramo in serie deve essere uguale e così pure la loro resistenza interna altrimenti ogni serie si scaricherebbe sulla vicina

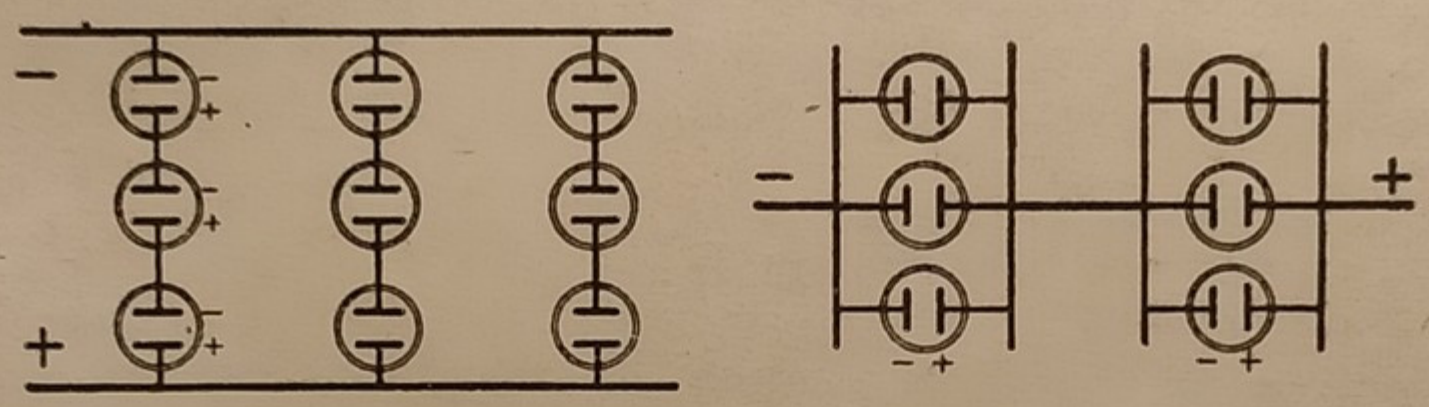


Fig. 57 - 58 - Accoppiamenti misti in serie e parallelo

2.° *Accoppiamenti in serie di gruppi in quantità.* — Il sistema è chiaramente indicato dalla figura 58.

ESERCIZI. — 1. Con una batteria di 10 pile Grenet che hanno 2 volt ciascuna e una resistenza interna di 0,1 ohm si vuol alimentare un apparecchio che ha 4 ohm. Quale sarà l'intensità della corrente mettendo le pile in serie, in derivazione, in due serie parallele?

R. Se le pile sono in serie avremo:

$$I = \frac{2 \times 10}{4 + 10 \times 0{,}1} = \frac{20}{5} = 4 \text{ amp.}$$

Se le pile sono in derivazione:

$$I = \frac{2}{4 + \frac{0{,}1}{10}} = 0{,}5 \text{ amp. circa}$$

Se le pile sono in due serie parallele la resistenza interna totale è la metà di quella di una serie di cinque pile ossia:

$$R_1 = \frac{5 \times 0{,}1}{2} = 0{,}25$$

Per la legge di Ohm avremo, essendo 5 gli elementi in serie e 2 la f. e. m. di ciascuno:

$$I = \frac{5 \times 2}{4 + 0{,}25} = 2{,}55$$

1.° *Problema da risolvere.* — Un ufficio telegrafico deve formare una batteria di pile Daniell capaci di dare 0,012 amp. su una linea di ferro di 5. mm. di diametro e di 20 chilometri di lunghezza (resistenza 7,8 ohm al Km.). La resistenza interna della pila è di 1 ohm. Quante pile si devono mettere in serie?

2.° Una batteria di 25 pile in serie inserita su un circuito esterno di 12 ohm da 2,5 amp. La f. e. m. delle pile è di 1,8 volt. Trovare la resistenza interna di ciascuna pila.

3.° Trovare la formola che da la intensità quando vi sono N serie parallele di n pile in serie ciascuna essendo r la resistenza interna e R la resistenza esterna; e la f. e. m. di ogni pila (Fig. 57).

49. ACCUMULATORI. — Gli accumulatori sono delle pile a *rigenerazione* e cioè pile che dopo essersi esaurite lavorando sopra un circuito esterno, si possono ogni volta ricari-

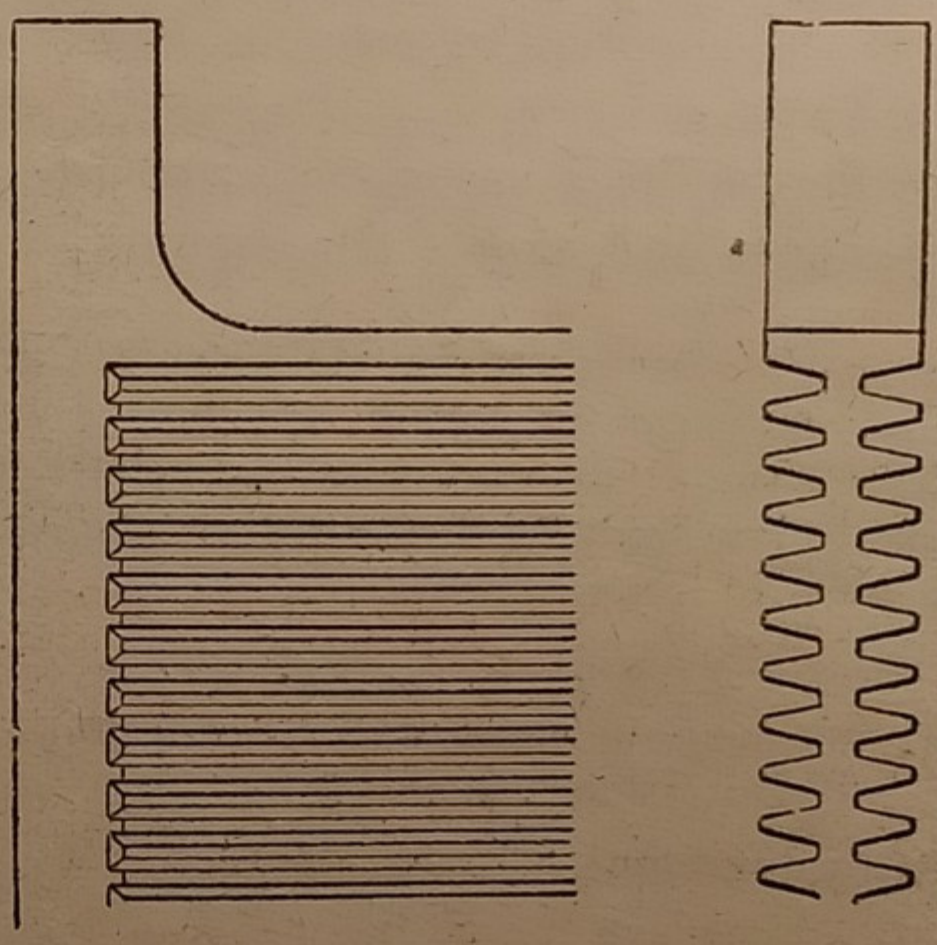


Fig. 59 . Lastre positive d'accumulatori

care inviando in esse una corrente in senso contrario. Gli elementi sono formati da due lastre di piombo immerse in una soluzione del 10% circa di acido solforico. Delle due lastre una è coperta di ossido color nero caffè (polo +) l'altra di piombo spugnoso (polo —). Caricando questo elemento l'acqua viene decomposta e l'idrogeno che si svolge al polo —

viene assorbito dal piombo spugnoso; l'ossigeno dal polo +. L'assorbimento dei gaz e la reazione chimica si compie in un sottil strato della superficie delle lastre. Quando le combinazioni chimiche si sono compiute nella crosta di materia attiva, l'ossigeno e l'idrogeno non possono più essere assorbiti e si svolgono liberamente sotto forma di bollicine; l'*ebollizione* provocata da questi gaz segna la fine della carica. Un elemento così caricato può ora servire come un'energica pila.

Tipi di accumulatori. — Il tipo più vecchio è quello *Plantè* formato da due lastre di piombo arrotolate e separate da liste di legno; le due lastre sono messe in un vaso di vetro

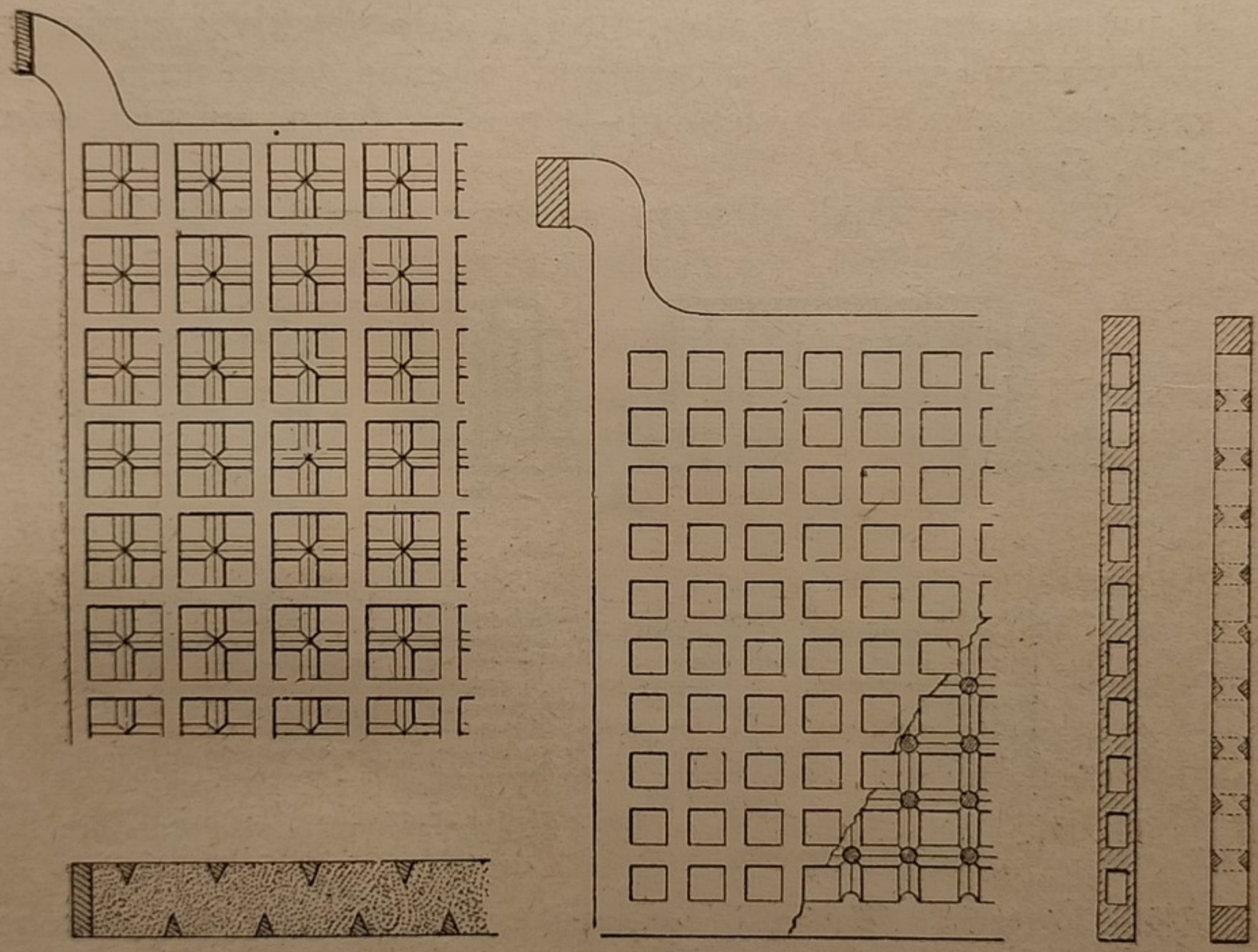


Fig. 60-61 - Lastre negative a reticolato.

contenente la soluzione di acido solforico. Questo accumulatore non ha un grande potere accumulante e richiede all'inizio una lunga preparazione che consiste nel caricare e scaricare l'elemento allo scopo di ingrossare lo strato attivo di piombo spugnoso e di ossido sulla superficie delle lastre. Questa operazione si dice *formazione*.

Si è pensato di accelerare la formazione provocando la ossidazione delle lastre positive con mezzi chimici, e di aumentare la superficie rigandola a solchi profondi e fini. (Fig. 59). In quanto alle negative si raggiunse lo scopo di una rapida formazione col *processo Faure* che consiste nel ricoprire delle lastre di piombo a griglia o perforate (fig. 60-61) mediante un impasto di litargirio e acido solforico. Tali placche negative sottoposte alla carica assorbono l'idrogeno; la pasta diventa piombo spugnoso. Al litargirio si aggiungono sostanze inerti per rendere più porosa la massa.

Ogni elemento di accumulatore è generalmente composto di più placche positive alternate con altre negative; le piastre positive sono unite da un regolo di piombo e così pure le negative. Riunendo più elementi in serie si forma una *batteria.* (Fig. 62-63).

Il numero degli elementi in serie determina la f. e. m.

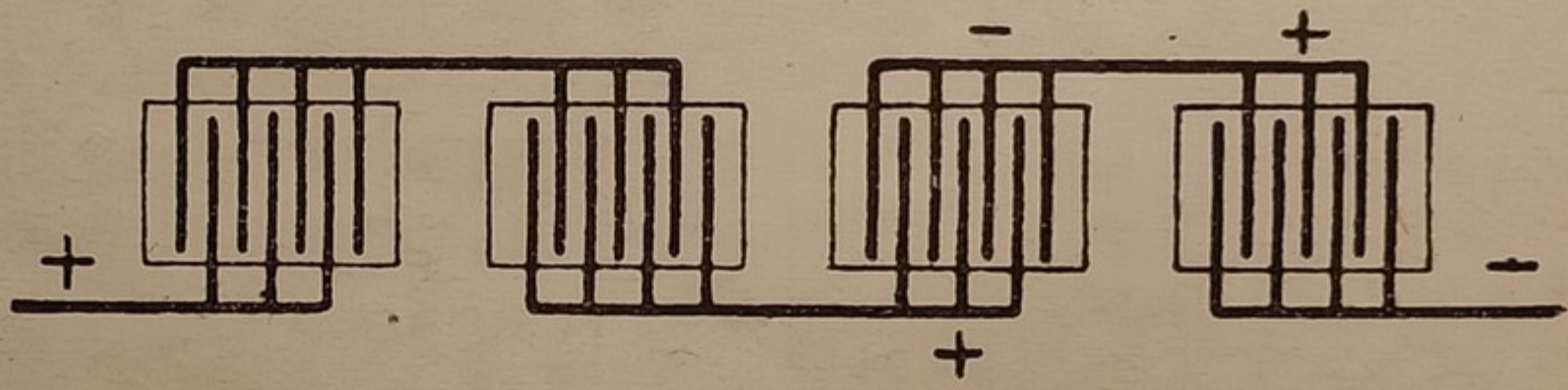


Fig. 62 - 63 - Metodi di unione degli elementi d'accumulatore.

della batteria; invece il numero e l'ampiezza delle placche per ogni elemento determina la capacità accumulatrice di corrente.

A seconda delle applicazioni gli accumulatori si costruiscono in due tipi: *tipi stazionari e tipi trasportabili.* I primi sono più pesanti e servono per gli impianti di illuminazione di città e stabilimenti, per riserva e regolazione della corrente nelle reti dei tram. I secondi sono più leggeri e sono impiegati per l'accensione dei motori a scoppio, per automobili, per campanelli elettrici, per l'illuminazione delle vetture ferro-

viarie, per sottomarini, per locomotive elettriche di manovra. I tipi trasportabili sono in recipienti chiusi di ebanite o di celluloide; quelli stazionari sono aperti e dentro a recipienti di vetro o di legno foderato di piombo.

La durata degli accumulatori dipende dalla più o meno accurata manutenzione e regolarità di carica e scarica.

Forza elettromotrice di carica e scarica. — Nella carica ogni elemento assorbe, a intensità costante, una tensione crescente da 2 volt a 2,8 al massimo. Nella scarica invece la tensione diminuisce da 2 volt a 1,75.

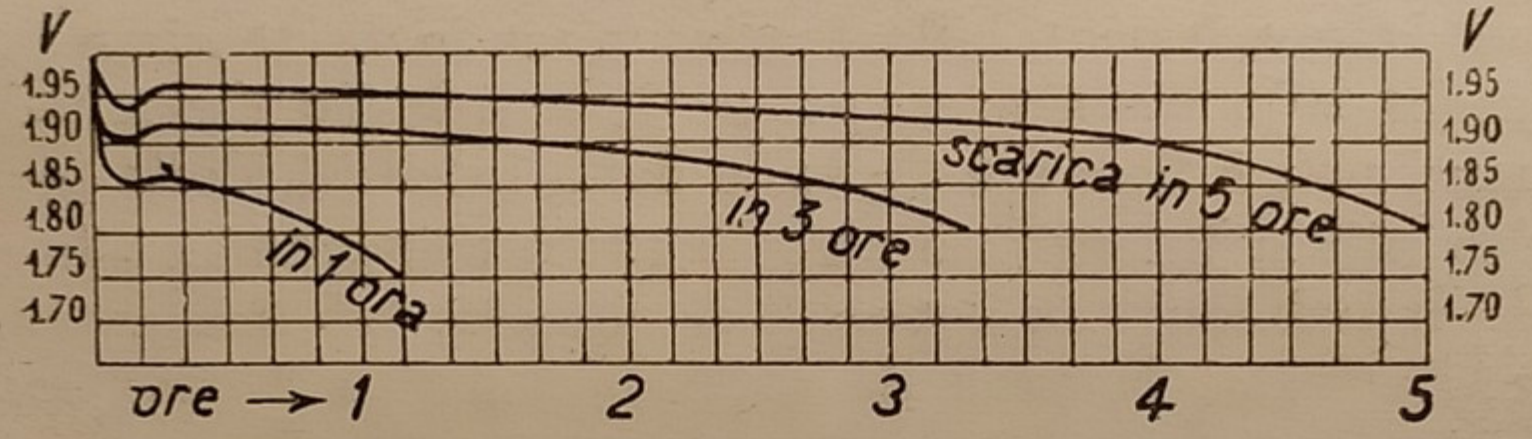


Fig. 64 - Diagrammi di scarica degli accumulatori.

Nelle figure 64-65 sono indicati i diagrammi di variazione della tensione di un elemento di accumulatore in funzione del tempo nella scarica e nella carica. Si osserva che scaricando con maggior intensità un accumulatore, ossia in un tempo più breve, la tensione cade più rapidamente e che caricando più lentamente si accumula una maggior quantità di elettricità.

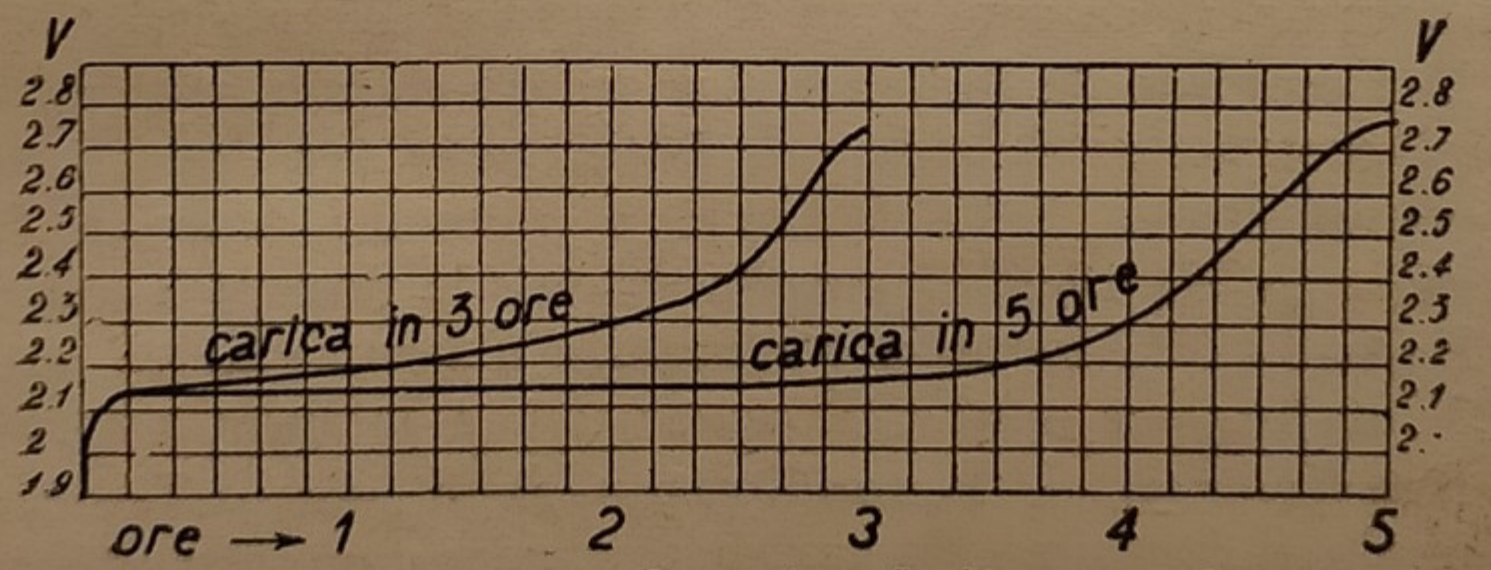


Fig. 65 - Diagrammi di carica degli accumulatori.

Di solito la carica si fa in 4 a 5 ore; la scarica dura da 3 a 3,5 ore. La corrente di carica nell'ultimo periodo e cioè quando comincia l'ebollizione si riduce a metà a un terzo della normale.

Soluzione acida. — La soluzione di acido solforico deve avere una densità di 1,18 a elemento quasi scarico e 1,20 Beaumè a elemento carico; dalla misura della densità con un densimetro Beaumè si può dedurre il grado di carica. Nell'esercizio degli accumulatori parte dell'acqua viene decomposta e la soluzione tende ad aumentare di densità; bisogna perciò aggiungere di tanto in tanto dell'*acqua distillata* per ripristinare il livello. L'acido solforico deve essere molto puro; esso viene fornito dai fabbricanti stessi degli accumulatori.

Capacità. — Si dice capacità di un elemento il numero di ampère-ora forniti alla scarica quando la tensione si abbassa del 10% circa e raggiunge 1,75 volt. La capacità degli elementi non è fissa ma dipende dalla intensità della scarica: quanto più la intensità è piccola tanto più grande è la capacità. Normalmente la capacità si riferisce ad una scarica in 3 ore. Se 100 è la capacità corrispondente a 3 ore; ecco le capacità relative per durate maggiori o minori:

Ore di scarica	1	2	3	5	7.05	10
Capacità relativa	69	83	100	110	123	133

La carica si fa con una corrente costante determinata dal costruttore; normalmente una carica completa richiede da 4 a 5 ore.

Capacità specifica. — Si chiama capacità specifica la quantità di corrente che può dare un chilogrammo di piastra o di accumulatore compreso il liquido e il recipiente.

Per esempio le batterie stazionarie danno a seconda dei diversi costruttori da 3,5 a 5 ampère-ora per kg. di piastra di accumulatore. Nelle batterie o elementi trasportabili si può ricavare da 10 a 15 ampèr-ora ma la durata è minore.

Il peso delle batterie stazionarie a lenta scarica equivale a 400-500 kg. per ogni chilowatt-ora ma la durata è minore.

Rendimento. — Il rendimento degli accumulatori varia a seconda del regime di carica e scarica; quanto più presto si fanno e quindi quanto più forti sono le correnti di carica e scarica tanto minore è il rendimento.

Però supposto di limitare la carica e la scarica a 3,5 ore, impiegando le intensità di regime fissate dai costruttori, il rendimento in quantità, ossia il rapporto fra gli ampèr-ora di scarica e quelli di carica, è di 0,85. Il rendimento di ener-

gia cioè il rapporto fra i watt-ora di scarica e di carica è di 0,75. Per ottenere questi rendimenti garantiti dai costruttori bisogna eseguire con cura le regole prescritte di carica, scarica e di manutenzione.

Numero degli elementi per formare una batteria. — Gli accumulatori si raggruppano in serie per formare delle batterie per ottenere una determinata f. e. m. Il numero degli elementi è determinato dividendo la f. e. m. che si vuol ottenere per la tensione minima che danno gli elementi a fine scarica ossia 1,75 a 1,8 Volt.

Per la trazione elettrica il numero degli elementi si calcola in base a 2 volt per elemento.

TABELLA N. 11 - Formazione delle batterie.

Tensione normale batterie	Numero elementi in serie	Tensione massima per la carica	Osservazioni
35	21	57	Il numero degli elementi si calcola in base a V : 1,75 dove V è la tensione normale della batteria arrotondando il risultato in più per tener conto di elementi di riserva. La tensione di carica massima, si ottiene moltiplicando il numero degli elementi per 2,7.
50	30	82	
65	38	105	
100	60	165	
110	65	175	
120	70	185	
150	86	230	
200	120	326	
250	150	410	
350	200	560	

Dinamo e accessori per le batterie. — Per la carica delle batterie si adoperano dinamo a corrente continua con eccitazione in derivazione. Piccoli accumulatori si possono caricare mediante una derivazione da una linea a corrente continua, inserendo nel circuito una lampada o più lampade in parallelo come resistenze regolatrici.

La fig. 66 indica uno schema per la carica degli elementi per automobili che normalmente hanno da 4 a 12 volt di tensione con corrente continua.

Si può anche fare la carica di piccoli elementi coi circuiti a corrente alternata, inserendo tra le lampade e l'accumulatore un bicchiere di vetro contenente due laminette una di piombo e una di alluminio immerse in soluzione di sale

qualsiasi, meglio fosfato ammonico. Negli impianti di batterie di accumulatori sono richiesti alcuni apparecchi di manovra e di sicurezza:

1.° Amperometro e voltometro per controllo dell'intensità di carica e della tensione.

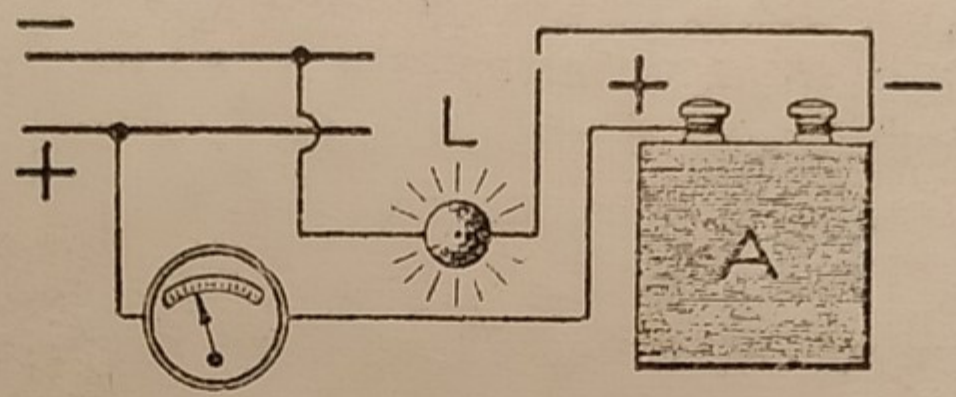


Fig. 66 - Carica dei piccoli elementi d'accumulatori.

2.° Interruttore automatico a minima per interrompere automaticamente il circuito di carica quando la corrente diventa quasi zero, impedendo un ritorno della corrente verso la dinamo.

3.° Interruttore automatico di massima oppure valvole fusibili per interrompere il circuito di scarica in caso di corti circuiti esterni.

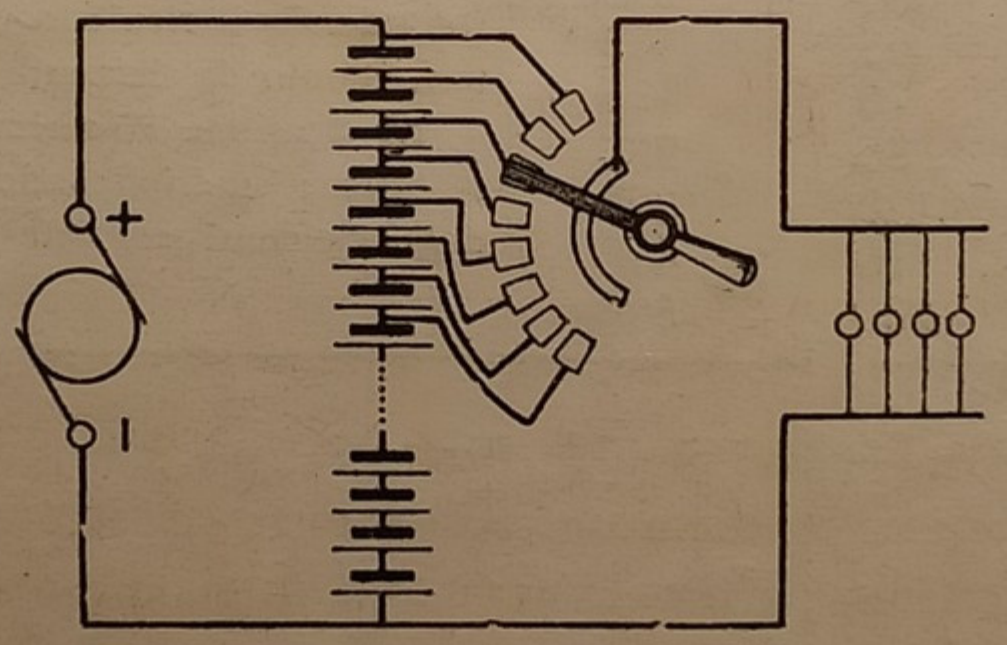


Fig. 67 - Inseritore semplice di elementi a rotazione.

4.° Regolatore di tensione o inseritore ad elementi onde regolare la tensione di scarica.

Il regolatore ad elementi (Fig. 67-68) è formato da un cursore che scorre su tanti contatti in comunicazione cogli ultimi elementi della batteria in modo che si possa inserire o disinserire degli elementi di batteria e mantenere una tensione costante nel circuito esterno. Per esempio una batteria

per 100 volt formata da 60 elementi ha una tensione appena caricata di 120 volt; col regolatore ad elementi allora si escludono circa 10 elementi della batteria appena comincia la scarica e poi si inseriscono mano mano che la tensione della batteria si abbassa nella scarica.

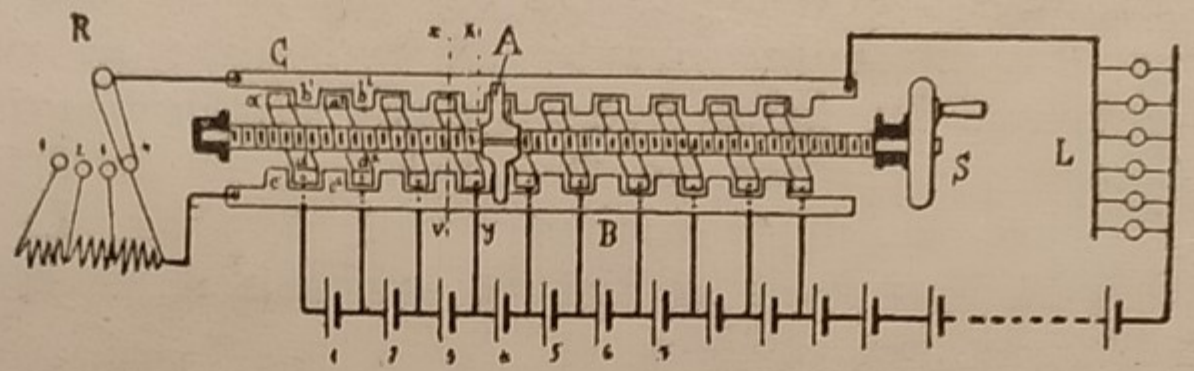


Fig. 68 - Inseritore di elementi a movimento rettilineo con resistenza per il corto circuito.

Servizio, manutenzione, installazione. — Le batterie stazionarie vengono installate in locali con buona ventilazione, pavimento di asfalto e allineati sopra telai di legno; sotto agli elementi si mettono degli isolatori di porcellana a fungo. Si deve lasciare spazio sufficiente ai lati della batteria per la verifica quotidiana degli elementi e per eventuali ricambi di placche. Pareti, soffitti, ferramenta, conduttori, ecc., nelle sale degli accumulatori devono essere verniciati a smalto. Le unioni delle piastre fra loro e fra un elemento e l'altro si fanno con saldatura autogena. Tutti gli attacchi dei fili di rame alle piastre devono essere accuratamente verniciate.

La manutenzione consiste sopratutto nel mantenere il livello della soluzione negli elementi in modo che le placche siano sommerse e nell'osservare ad ogni periodo di carica se gli elementi incominciano tutti insieme la loro ebollizione. Quando un elemento ritarda o non bolle a fine carica è segno che vi è tra le placche un corto circuito metallico. I metodi per eliminare i corti circuiti sono indicati dalle case costruttrici.

Si devono: evitare le scariche prolungate oltre i limiti di abbassamento di tensione regolamentari; evitare le cariche troppo prolungate; tenere grande pulizia nel locale; evitare di mettere acqua impura negli elementi poichè bastano impurità lievissime di rame, mercurio, acido nitrico o cloridrico, di ferro, ecc., perchè gli elementi si guastino e abbiano a scaricarsi

anche quando sono in riposo ed aperto il circuito esterno. Aggiungere al bisogno sola acqua distillata.

Esercizi di calcolazione sugli accumulatori.

1. Uno stabilimento deve far fare l'installazione di una batteria d'accumulatori per alimentare un circuito di lampadine di riserva per illuminazione notturna. La batteria deve poter alimentare in media 100 lampade a filamento metallico da 25 candele e 10 da 200 candele da mezzo watt. La tensione delle lampade è di 120 volt. La durata massima della illuminazione è di 10 ore. Il consumo delle lampade da 25 candele è di 1,2 watt per candela.

Si domanda: 1. Il numero degli elementi costituenti la batteria. - 2. La capacità di ciascun elemento. - 3. La tensione massima necessaria per la carica. - 4. Il numero degli elementi da mettersi sull'inseritore.

R. 1. Il numero degli elementi da mettere in serie si ottiene dividendo la tensione di 120 V. per la f. e. m. minima di ciascun elemento ossia 1,75 e arrotondando la cifra con qualche elemento in più per scopo di riserva:

$$\frac{120}{1{,}75} = 70 \text{ elementi}$$

2. La capacità degli elementi dovrà essere corrispondente al numero degli ampère per il numero delle ore. Ora il numero dei watt assorbiti dalle lampade è espresso:

$$100 \times 25 \times 1{,}2 + 10 \times 200 \times 0{,}5 = 4000$$

L'intensità della corrente è data dai watt diviso volt:

$$4000 : 120 = 34 \text{ ampère}$$

Siccome l'illuminazione deve durare 10 ore, la capacità degli elementi deve essere di 34×10 ossia 340 ampèr-ore.

3. La f. e. m. richiesta da ciascun elemento a fine carica è 2,7; per 70 elementi da caricarsi in serie occorreranno:

$$70 \times 2{,}7 = 189 \text{ volt}$$

4. Dato che la batteria in principio scarica ha 1,95 volt per ogni elemento basteranno a dare 120 volt:

$$120 : 1{,}95 = 61 \text{ elementi}$$

L'inseritore deve quindi poter regolare gli elementi fra 61 e 70 cioè 9 elementi. Per sicurezza si può costruire l'apparecchio con 10 o 12 contatti.

2. Calcolare la tensione e la potenza di una dinamo per caricare una batteria di 70 elementi in una sola serie in 5 ore. Gli elementi hanno una capacità di 500 Ampère-ora.

R. La tensione della batteria in carica sale lentamente per 4/5 della durata fino a 2,3 volt per elemento. Perciò la dinamo deve poter fornire a pieno carico una tensione di:

$$2{,}3 \times 70 = 161 \text{ volt}$$

Nell'ultima ora di carica si può ridurre la intensità ma la tensione deve poter arrivare a 2,7 volt per elemento e cioè complessivamente:

$$2{,}7 \times 70 = 189 \text{ volt}$$

Ammesso un rendimento di 0,8 per la carica occorrerà una quantità di corrente di: 500 : 0,8 = 625 ampère-ora. Calcolando di caricare la batteria per 4 ore a piena corrente e per un'ora a un terzo, la intensità media I sarà data dalla equazione:

$$4 \times I + 1 \times 0{,}33\ I = 625$$

Da cui si cava I = 145 ampèr.

La potenza della dinamo dovrà essere perciò:

$145 \times 161 = 23545$ ossia circa 24 chilowatt

CAPITOLO III.

Magnetismo ed elettromagnetismo

50. Magneti e fenomeni magnetici. — Il magnetismo è la proprietà che ha il ferro e suoi derivati (acciaio, ghisa, ferro-leghe) e in piccola proporzione anche il nichel, il cobalto ed alcuni minerali di ferro, di attirare la limatura e pezzi di ferro.

Ciò che distingue ferro, acciaio e ghisa è il tenore di carbonio. Così si dice *acciaio* il ferro che contiene da 0,1 a 2 per cento di carbonio. La ghisa contiene da 2 a 4,5 per cento di carbonio.

I *magneti* o *calamite* possono essere *naturali* oppure *artificiali*. I magneti naturali sono formati da un minerale di ferro detto magnetite.

I magneti artificiali sono formati di acciaio duro e temperato; i migliori magneti sono fatti con acciaio del *tipo rapido* con 0,8 di carbonio e 8-10 per cento di tungsteno e 1-2 per cento di vanadio. Si è scoperta una lega di ferro e cobalto colla quale si possono fare magneti molto più forti di quelli ottenuti con acciaio rapido. I magneti che comunemente si incontrano nella pratica hanno forme di sbarre diritte oppure piegate a ferro di cavallo, oppure a forma di *aghi*. Cogli aghi calamitati si fanno le *bussole* ed i *galvanometri*.

Un ago magnetico libero di muoversi orizzontalmente sopra un perno, si dispone sempre nella direzione nord-sud. Si dice *polo nord* dell'ago l'estremità che volge verso nord; *polo sud* l'altro.

Altri fenomeni caratteristici dei magneti sono:

1.° L'ago magnetico nel disporsi da nord a sud non prende esattamente la direzione del meridiano astronomico del luogo ma una posizione alquanto inclinata rispetto al medesimo. L'angolo fra le due direzioni si dice *declinazione magnetica.* (Fig. 69).

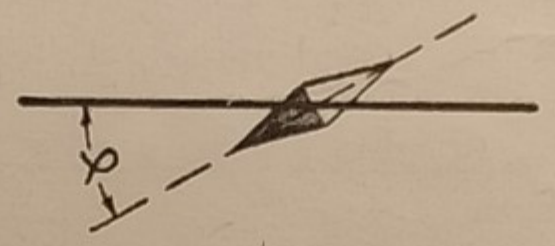


Fig. 69 - Declinazione dell'ago magnetico.

2.° Se l'ago magnetico si mette in bilico sopra un asse orizzontale in modo da potersi muovere liberamente solo in un piano verticale esso prende una posizione inclinata rispetto all'orizzonte. L'angolo che esso forma coll'orizzontale si dice di *inclinazione;* esso varia colla latitudine del luogo.

3.° Se si avvicinano due aghi calamitati o due sbarre calamitate libere di muoversi si osserva che i poli omonimi si respingono e i poli contrari si attraggono. (Fig. 70-71).

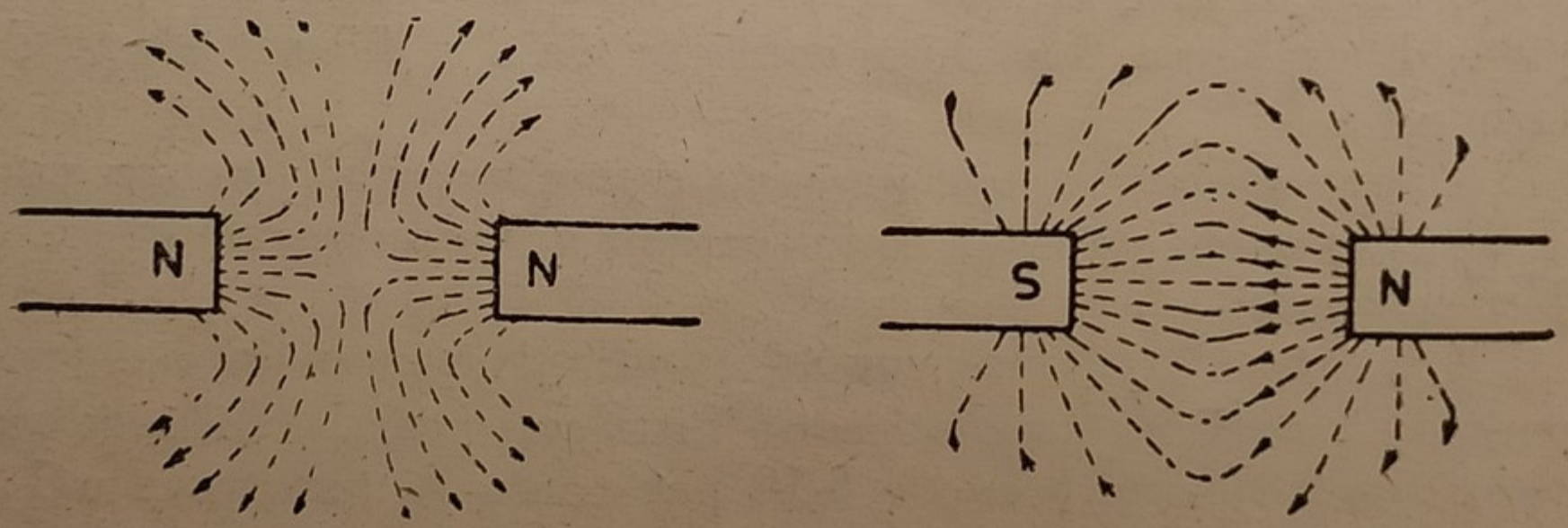


Fig. 70-71 - I poli opposti si attraggono; i poli omonimi si respingono.

4.° Immergendo un magnete artificiale in una massa di limatura di ferro si osserva subito che questa si attacca in forma di filamenti lunghi e serrati verso i poli e rari verso la metà. Si vede cioè che la forza di attrazione è assai maggiore e concentrata nei poli.

5.° Se ad un magnete si avvicina un pezzo di ferro o di acciaio non calamitato, esso si magnetizza pure, rivelando una

polarità di nome contrario sulla faccia che prospetta il magnete.

Questo fenomeno si dice di *magnetizzazione per influenza* o per *induzione*.

6.° Se si spezza una calamita diritta in due, in tre, in più parti si ottengono altrettante calamite, rivelando nei punti di rottura polarità opposte. (Fig. 72).

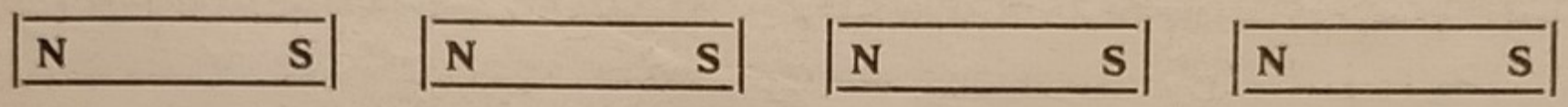


Fig. 72 - Spezzando una calamita si ottengono altre calamite.

Da questo esperimento è lecito dedurre come una calamita sia composta da tante piccole calamite e cioè che le molecole del magnete siano esse medesime altrettante calamite tutte orientate nel medesimo senso. Ogni magnete ha due poli.

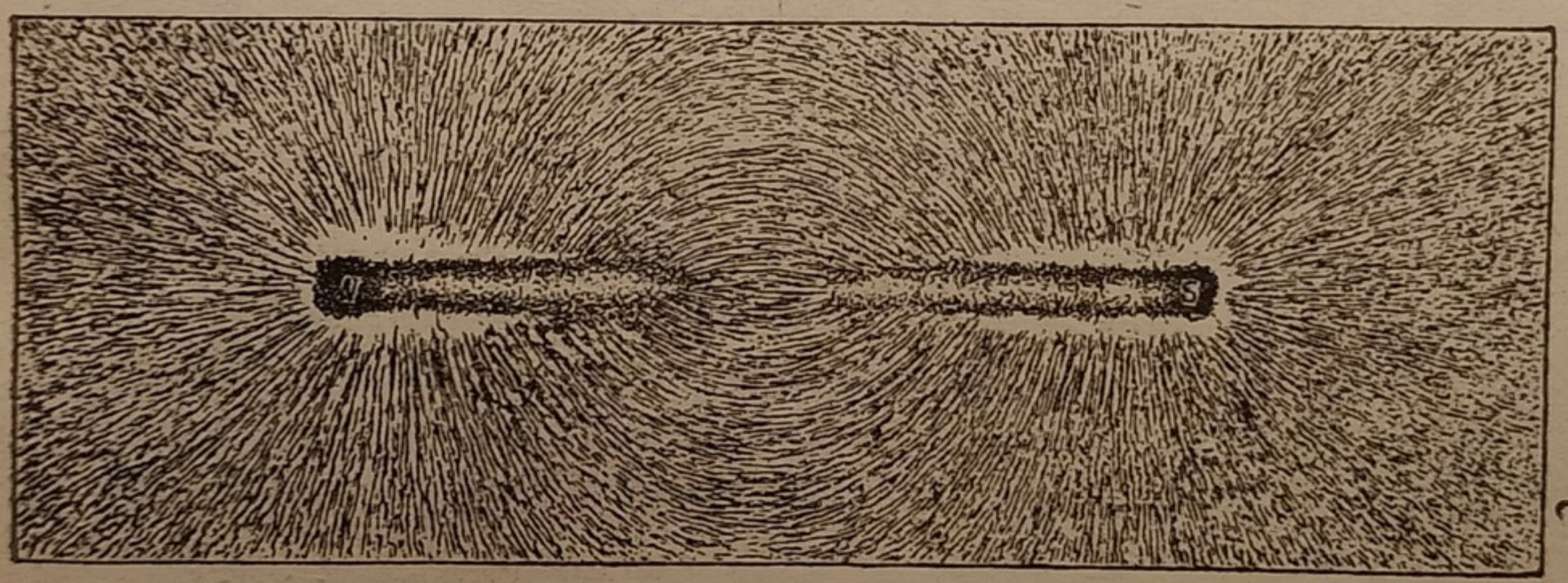


Fig. 73 - Spettro magnetico di calamita diritta.

ESPERIENZE. — Tutti i fenomeni fin qui enunciati si possono facilmente dimostrare con calamite ad aghi magnetici. Sopratutto interessanti sono gli spettri magnetici ottenuti spolverando con limatura dei cartoncini sotto i quali si dispongono i poli di una calamita oppure una calamita diritta ecc. E' necessario richiamare l'attenzione sull'andamento delle curve dei filamenti (Fig. 73).

51. Campo magnetico. — Ora che abbiamo passato in rassegna i principali fenomeni magnetici è interessante di esaminarli dal lato quantitativo per poterli misurare. Per semplificare lo studio del magnetismo si è immaginato di rappre-

sentare le calamite con due punti (poli) nei quali sono concentrati gli opposti fluidi magnetici o *masse magnetiche* che danno origine alle forze di attrazione o ripulsione.

Lo spazio circostante ai poli nel quale si fanno sentire le forze si chiama *campo magnetico*; esso viene rappresentato da tante linee, dette *linee di forza* la cui configurazione è presso a poco quella che assumono i filamenti di limatura di ferro negli spettri magnetici. Le linee di forza sortono a fascio dal polo nord delle calamite; si aprono a ventaglio e spiegandosi ad arco vanno a riunirsi di nuovo in un fascio simmetrico al polo sud. Ogni linea di forza rappresenta la traiettoria che seguirebbe un corpuscolo di ferro che venisse attratto da un polo. Un ago magnetico messo in un punto di un campo magnetico si dispone tangente alla linea di forza passante in quel punto.

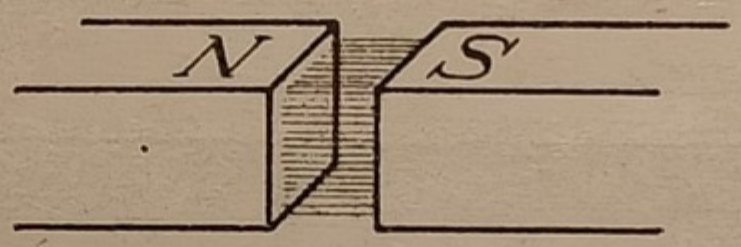


Fig. 74 : Campo magnetico uniforme.

Il fascio delle linee di forza uscente da un polo costituisce un *flusso di linee di forza* o *flusso magnetico* o *flusso di forza*. Convenzionalmente si ritiene che la direzione delle linee magnetiche corra compatto anche nell'interno del magnete e che cioè le linee di forza non abbiano nè principio nè fine e formino tante linee chiuse.

Il percorso che fa un flusso magnetico si dice *circuito magnetico* per l'analogia che esso ha col circuito elettrico: un circuito magnetico può essere interamente di ferro, oppure di ferro e interspazi d'aria. Così una calamita a ferro di cavallo colla sua armatura costituisce un *circuito magnetico chiuso di ferro*.

L'addensamento delle linee di forza passanti nella unità di superficie in un punto del campo costituisce la *densità* o *intensità* del campo magnetico: essa esprime la *forza magnetica* o *forza magnetizzante* che vi è in quel punto.

La rappresentazione di un campo magnetico a mezzo di un fascio di linee di forza — concepito da Faraday — è puramente teorica, ma serve per rivestire di un senso materiale la

disposizione, la direzione e l'intensità delle forze in giuoco. La densità del campo magnetico ossia il numero delle linee di forza attraversante la sezione di un centimetro quadrato perpendicolare al flusso, esprime la forza che vi è in quella sezione.

Si è convenuto di definire *unità di campo magnetico* od unità di forza magnetica o magnetizzante quella in cui un polo puntiforme calamitato colla massa uno di magnetismo viene sollecitato (attratto o ripulso) colla forza di una dina (1/981 di grammo). Tale campo magnetico viene rappresentato con una linea di forza per cmq. di sezione retta del flusso.

Quando si dice, ad esempio, che il campo magnetico di una dinamo è di 6000 unità, ciò significa che il campo si ritiene formato da 6000 linee per cmq. e che un polo di massa magnetica uno viene attratto o ripulso con una forza di 6000 dine. Il numero 6000 si dice *intensità del campo* e si esprime nelle formule col simbolo H se il campo è nell'aria.

L'unità di forza magnetizzante si dice *Gauss*.

Un campo magnetico si dice *uniforme* quando le linee di forza sono parallele e ad uniforme distanza. La forza magnetizzante o intensità è allora uniforme in ogni punto del campo. (Fig. 74). Per esempio il campo magnetico orizzontale terrestre è 0,22 linee per $cm.^2$ e la componente verticale in media di 0,40 (Italia).

Un flusso magnetico uniforme è uguale alla sua sezione in cmq. moltiplicato per la intensità; esso si indica normalmente con la lettera greca Φ.

52. Legge delle attrazioni e ripulsioni o di Coulomb. Unità di quantità di magnetismo o massa magnetica.

— Il primo fisico che studiò le leggi del magnetismo fu Coulomb — verso il 1800; — questi misurando la forza di attrazione delle calamite in relazione alle diverse distanze trovò che le quantità di magnetismo dei poli di una stessa calamita sono uguali e che *la forza di attrazione o ripulsione fra due calamite è proporzionale alla quantità di magnetismo nei poli ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza*; cioè si ha:

$$f = k \frac{m \times m_1}{r^2}$$

dove m e m_1 sarebbero le quantità di magnetismo contenute nei poli e r la loro distanza, e k un coefficiente di proporzionalità.

Da questa formola scaturisce la definizione di *unità di magnetismo* o di *massa magnetica*: essa è quella concentrata in un polo di calamita che attrae o respinge un altro polo coll'uguale quantità di magnetismo posto alla distanza di un centimetro colla forza di una dina. Allora mettendo:

$$f = 1 \text{ e } r = 1 \; m_1 = m = 1 \text{ si ha } K = 1$$

Nel paragrafo precedente abbiamo definito come unità di campo magnetico quella di un campo in cui un polo colla unità di magnetismo viene attratto o respinto colla forza di dina. A questo campo corrisponde una linea di forza per ogni cmq. Ora se si immagina una sfera di un cm. di raggio intorno ad un polo posto al centro racchiudente l'unità di magnetismo essa avrà per superficie 4π cmq.; se su ciascun cmq. di superficie mettiamo un polo pure coll'unità di magnetismo esso sarà attratto o respinto con una dina. Bisogna quindi ammettere che *da un polo coll'unità di magnetismo sortono* 4π *linee di forza* e se il polo è m volte più forte da esso sortiranno $4\pi m$ linee di forza. Cioè il flusso di linee che emana un polo magnetico è $N = 4\pi m$.

Se intorno ad un polo magnetico ridotto ad un punto matematico nello spazio immaginiamo diverse sfere concentriche di diverso raggio. qualsiasi massa magnetica portata da una sfera all'altra dovrà vincere una forza e percorrere uno spazio, cioè dovrà eseguire un lavoro. Se invece la massa magnetica si muove sulla superficie della sfera non eseguisce nessun lavoro poichè si muove perpendicolarmente alla direzione delle forze. Si dice che le sfere sono a diverso « potenziale magnetico » e che la superficie di una sfera qualsiasi rappresenta una superficie « equipotenziale ».

53. Induzione magnetica e comportamento dei corpi magnetici e diamagnetici. — Portando un pezzo di ferro nel campo magnetico d'aria di un'altra calamita esso si magnetizza; inoltre le linee di forza vengono attratte e diventano più numerose. Ciò equivale a dire che il ferro ha la proprietà di moltiplicare le linee di forza esistenti nell'aria. Il flusso di linee di forza che si produce nel ferro si dice *flusso di induzione*. (Fig. 75).

Se indichiamo con H l'intensità del campo dell'aria e con B quella del ferro avremo che B è per il ferro molto maggiore di H cioè avremo:

$$B = \mu H \qquad \text{ossia} \qquad \mu = \frac{B}{H}$$

dove μ è un coefficiente che si dice *permeabilità*. Tale coefficiente è maggiore di 1 per il ferro, l'acciaio, la ghisa, il nichel ed il cobalto (*paramagnetici*). Per l'aria μ = uno. Vi sono poi dei corpi detti *diamagnetici*, come il bismuto, l'antimonio, lo zinco, lo stagno, il piombo, ecc., pei quali il coefficiente μ è poco minore di 1; questi corpi portati in un campo magnetico tendono a diradare ed a respingere le linee di forza. (Per il bismuto $\mu = 0{,}99$). Essi si polarizzano in verso contrario a quello del ferro.

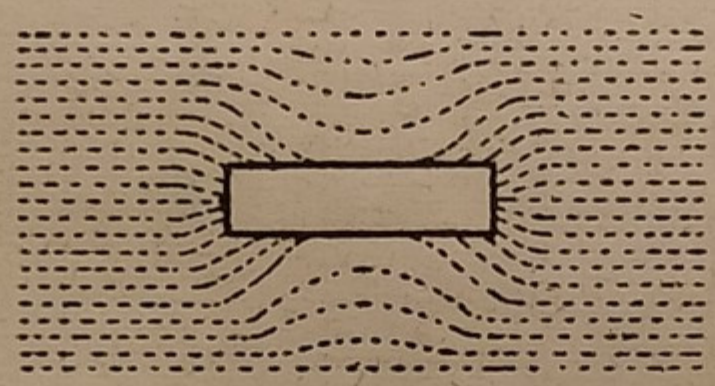


Fig. 75 - Proprietà del ferro in un campo magnetico.

Il valore di B si dice *induzione* e si misura con la unità Maxwell che esprime il numero delle linee di forza interne al ferro per centimetro quadrato.

Il ferro dolce è il materiale magnetico che ha la maggiore permeabilità ed il coefficiente μ può arrivare a 2500-3000; l'acciaio ha una permeabilità poco minore; la ghisa circa un terzo di quella del ferro.

Il ferro dolce sottratto all'azione del campo influenzante perde il suo magnetismo; l'acciaio invece lo conserva più o meno tenacemente; si dice che l'acciaio ha una *forza coercitiva*, cioè la capacità di mantenersi sempre magnetizzato.

Il coefficiente μ non è costante per un determinato ferro ma varia e precisamente diminuisce coll'aumentare del valore di H. Anzi quando il valore di H è già altissimo cioè il campo è molto intenso allora il ferro non ha più nessun potere moltiplicatore. *In tali condizioni si dice che il ferro è saturo.*

Alcuni valori di μ sono portati nella tabella 12 seguente:

Tali valori di H, di B e di μ si possono mettere sotto forma di curve portando sopra due assi ortogonali i valori corrispondenti.

Le curve che hanno per ascisse il valore di H e per ordinate i valori di B, si dicono *curve di magnetizzazione.*

La temperatura non influisce molto sulla permeabilità

TABELLA N. 12 - Permeabilità del ferro e della ghisa.

Ferro Forgiato Ricotto			Ghisa Grigia		
H	B	μ	H	B	μ
2	5000	2500	5	4000	800
4	9000	2250	10	5000	500
5	10000	2000	21.5	6000	279
6.5	11000	1692	42	7000	166
8.5	12000	1412	80	8000	100
12	13000	1083	127	9000	71
17	14000	823	188	10000	53
28.5	15000	526	292	11000	37
52	16000	308	—	—	—
105	17000	161	—	—	—
200	18000	90	—	—	—
350	19000	54	—	—	—

del ferro fino a 650°-680°; oltre questo limite il ferro perde le sue proprietà magnetiche e tra il rosso scuro e il rosso ciliegia (700°-800) la sua permeabilità è uguale a quella dell'aria cioè $\mu = 1$.

Quindi per scalamitare un ferro basta scaldarlo a 700°.

Le calamite permanenti d'acciaio conservano lungamente il loro magnetismo quando vengono mantenute per parecchie ore a 150°.

Il nichel perde il suo magnetismo a 310°.

Le impurità nel ferro e sopratutto il tenore del manganese possono alterare di molto la permeabilità del ferro; col 12% di manganese il ferro perde le sue facoltà magnetiche. Perciò nelle costruzioni di macchine elettriche non si devono usare ferri con tenore maggiore di 0,2-05% di manganese. Il silicio influisce pure sfavorevolmente sulla permeabilità ma viceversa diminuisce le perdite per isteresi.

Il cromo, il molibdeno, il tungsteno, il cobalto diminuiscono la permeabilità, ma fanno aumentare la forza coercitiva.

La tempra dell'acciaio aumenta di molto la forza coercitiva e la ricottura favorisce la permeabilità.

54. Forza di attrazione o portante dei magneti. — Per semplificare i calcoli, i poli delle calamite si sono considerati come punti nei quali sono concentrate delle masse di fluido magnetico. Una superficie estesa di un polo di un magnete si può considerare come un aggregato di poli puntiformi elementari.

Immaginiamo due faccie vicinissime e parallele NN e SS di due poli magnetici. (Fig. 76). In tal caso il campo H nell'aria fra le due faccie si può ritenere uguale a B ossia all'intensità del campo nel ferro.

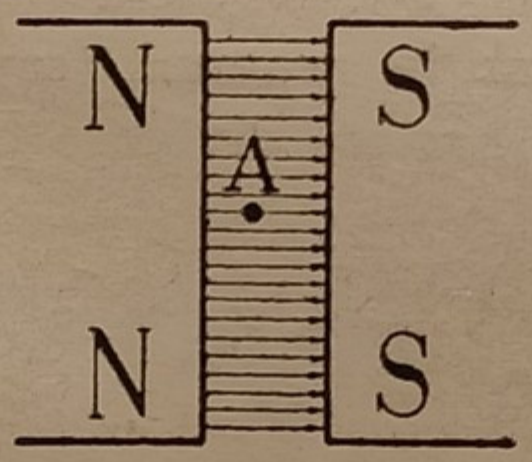


Fig. 76 . Dimostrazione della forza attrattiva dei magneti.

Supponiamo che la superficie NN sia suddivisa da un reticolato in tanti centimetri quadrati e che il centro di ciascun cmq. (elemento) formi un polo di massa m. Un polo di massa uno, con una certa polarità, concentrato in un punto A fra le due faccie viene attratto da una parte con una forza di $2\pi m$ linee di forza e dall'altro respinto con uguale forza. Cioè l'unità di polo magnetico (dal quale abbiam visto sortono 4π linee di forza) sarebbe sollecitato da una forza $4\pi m$. Ciò significa che il campo magnetico fra le due faccie NN e SS è rappresentato da tante linee di forza parallele con una densità $4\pi m$ linee per cmq. e quindi che la induzione B avrà per valore $4\pi m$.

Supponiamo ora che il polo A sia uno qualunque dei poli elementari della faccia SS avente una massa m. Esso

sarà attratto verso NN da una forza $f = 2\pi\ m^2$ ed essendo S la superficie del magnete in cmq. la forza totale sarà:

$$F = S\ 2\ \pi\ m^2 \text{ dine}$$

Ma $B = 4\ \pi\ m$ ossia:

$$m = \frac{B}{4\ \pi}$$

Sostituendo nella formola precedente si ha:

$$F = S \times 2\ \pi \times \frac{B^2}{16\ \pi^2}$$

$$F = S\ \frac{B^2}{8\ \pi} \text{ dine}$$

Per avere la forza in grammi (sapendosi che 981 dine formano un grammo) basterà dividere F per 981. La formola diventa:

$$F = S\ \frac{B^2}{24652} \text{ gr.} \quad \text{pari a Kg.} = S\ \frac{B^2}{24.652.000} = S\ \frac{B^2}{5000^2}$$

Da questa formola si può cavare il valore B dell'induzione di una calamita qualora si conosca la forza F di attrazione dell'armatura e la superficie in cmq.

La formola è valevole solo quando le due faccie NN e SS siano a contatto o molto vicine fra loro, in modo che si possa ritenere che il valore di B nel ferro sia uguale a quello nell'interferro.

Ecco la forza di attrazione in gr. per ogni cmq. di superficie e l'induzione B corrispondente:

B	=	1000	2000	3000	4000	5000	7000	10000	15000
F =	*gr.*	46	163	365	649	1014	1980	4060	9100

ESEMPIO. — Una calamita a ferro di cavallo può sostenere un'ancora di 5 Kg. - la sezione di combaciamento di ciascun polo è di 6 cmq. Qual'è l'induzione B e quale il flusso?

R. Dalla formola precedente si ha:

$$B = \sqrt{\frac{F \times 24652}{S}}$$

Sostituendo a F il valore di 5000 gr. diviso per 2 (essendo due le superfici attraenti) e mettendo S = 6 si ha: B = 3200.
Il flusso totale sarà 3200 × 6 = 19200 unità.

55. Campo magnetico di una corrente e di un solenoide. — Tutte le volte che si avvicina un ago calamitato ad un filo percorso da una corrente continua l'ago tende a disporsi perpendicolarmente al filo. (Fenomeno di Oersted). (Fig. 77).

Questo dimostra che esternamente si forma un campo magnetico le cui linee di forza sono perpendicolari al filo.

Un'altra esperienza più convincente si può avere facendo passare un filo percorso da una corrente attraverso ad un cartoncino bianco o lastra di vetro sulla quale è stata sparsa della limatura di ferro. (Fig. 78). Si vede allora formarsi

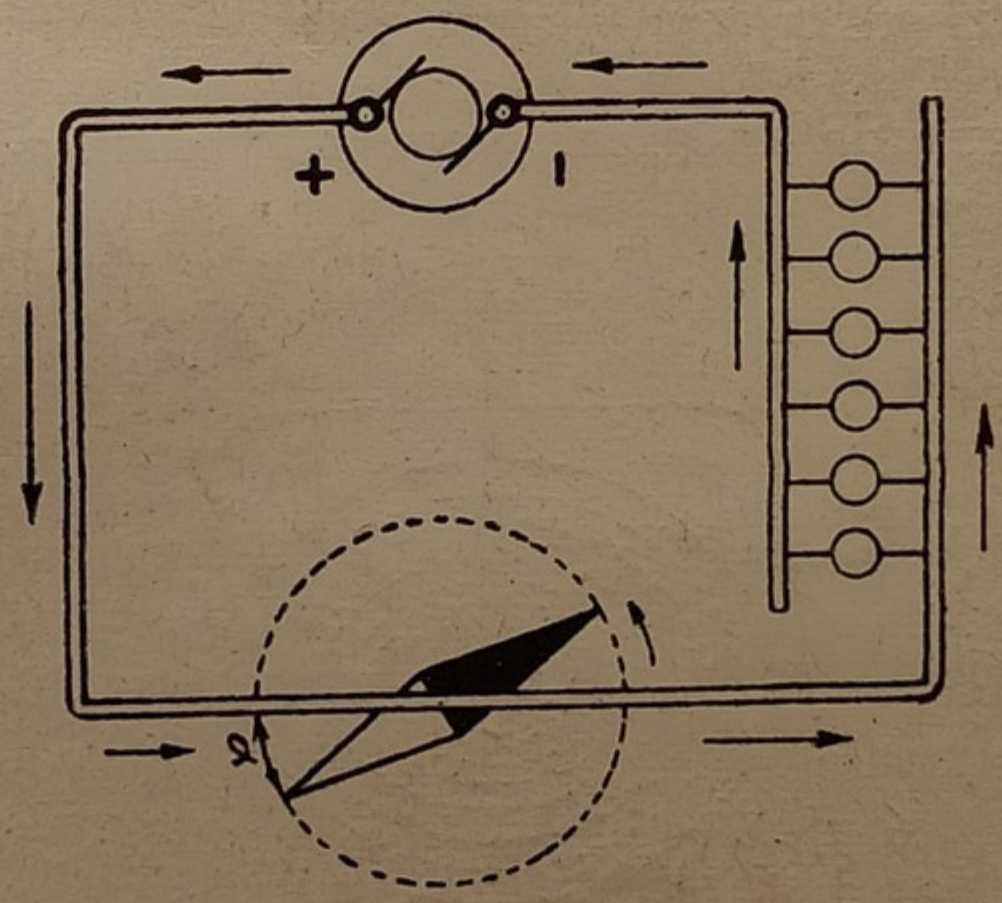


Fig. 77 - Fenomeno di Oersted.

uno *spettro magnetico* con tanti filamenti disposti in linee circolari aventi per centro il filo.

Si deduce da ciò che le linee di forza formanti il campo magnetico intorno al filo sono rappresentate da tanti circoli

che sono fitti al centro e vanno diradan(dosi verso l'esterno. (Fig. 79-80). La direzione di queste linee è data da questa

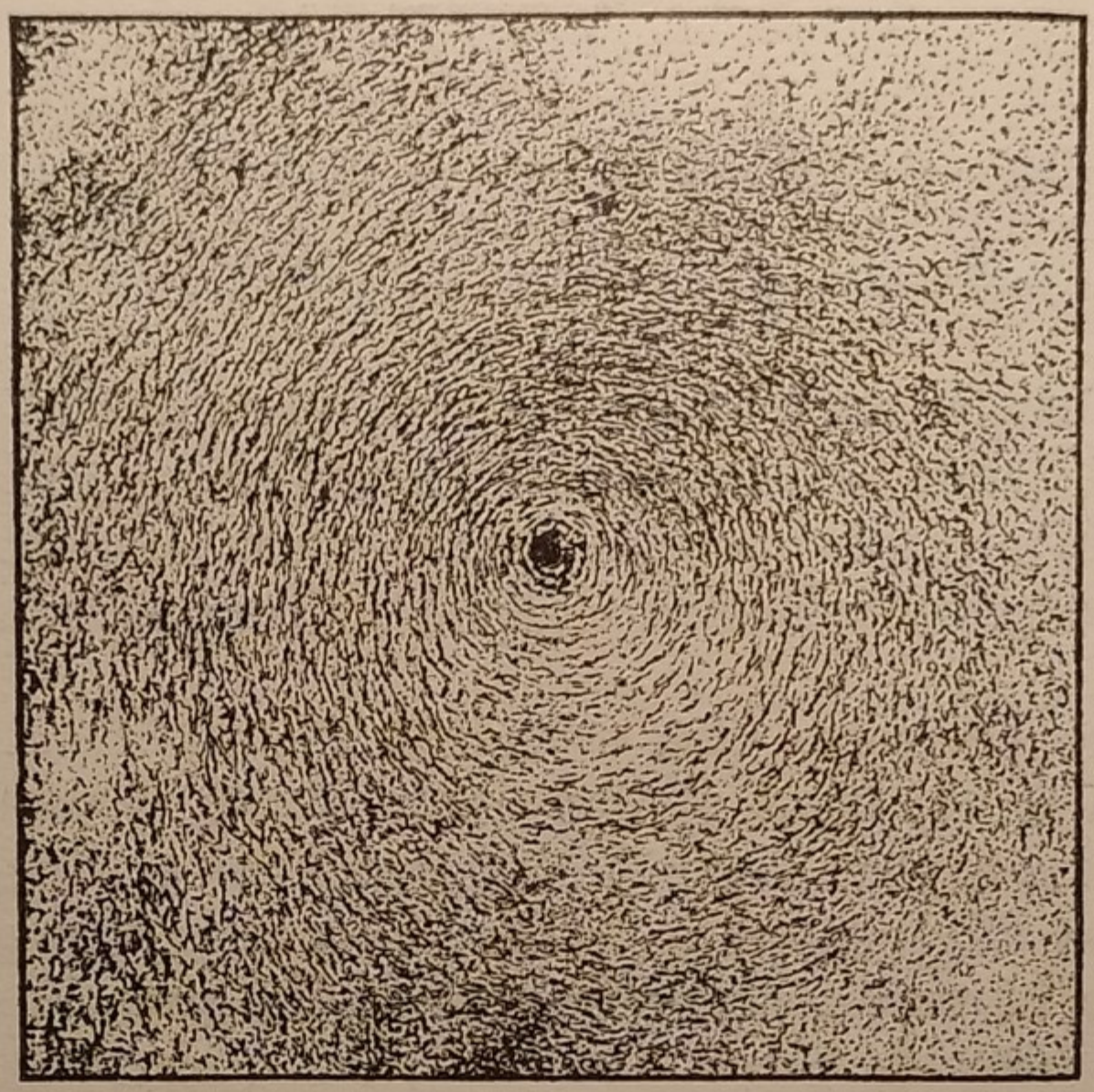


Fig. 78 - Spettro magnetico di una corrente diritta.

regola: se si guarda un piano perpendicolare ad un filo nella

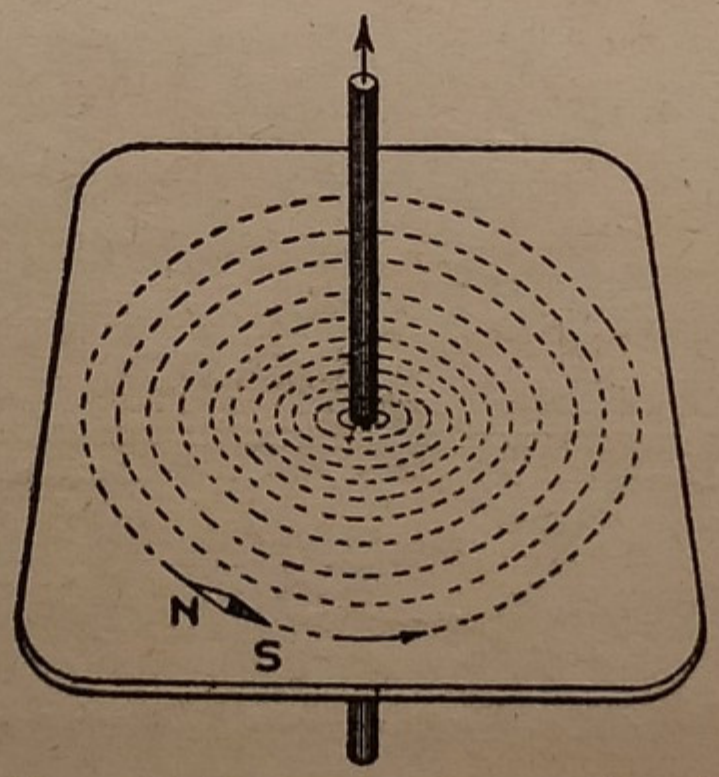


Fig. 79 - Linee di forza del campo magnetico intorno ad un filo.

direzione stessa con cui scorre la corrente (dal + al —) le linee di forza hanno la direzione della rotazione delle sfere di un orologio.

L'intensità del campo, creato da un filo di lunghezza infinita percorso da una corrente *i*, espressa in ampère in un punto distante *r* centimetri dal filo è espressa da (Legge di Biot e Savart):

$$H = \frac{2\ i}{10\ r}$$

Se si avvolge un filo percorso da una corrente continua in modo da formare una spirale cilindrica, allora la mag-

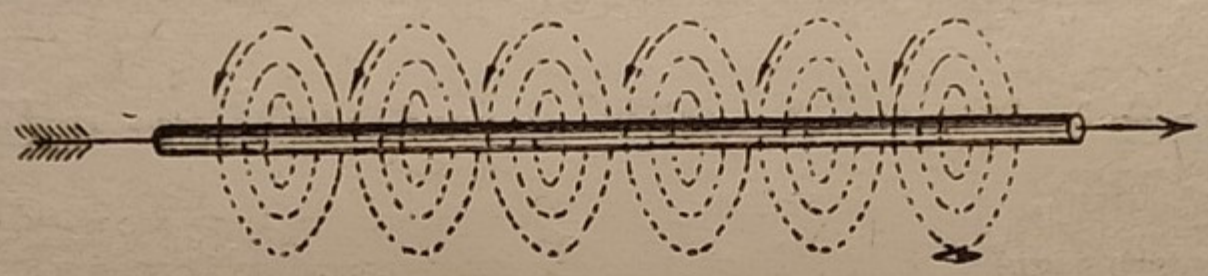


Fig. 80 . Campo magnetico intorno ad un filo sotto corrente.

gior parte delle linee di forza interne si attirano e si confondono formando un flusso magnetico di linee parallele all'asse della spirale (Fig. 81) e aprentesi come nelle calamite a ventaglio alle estremità.

Una spirale cilindrica di filo si dice *solenoide*. Un solenoide si comporta quindi come una calamita diritta. (Fig.82).

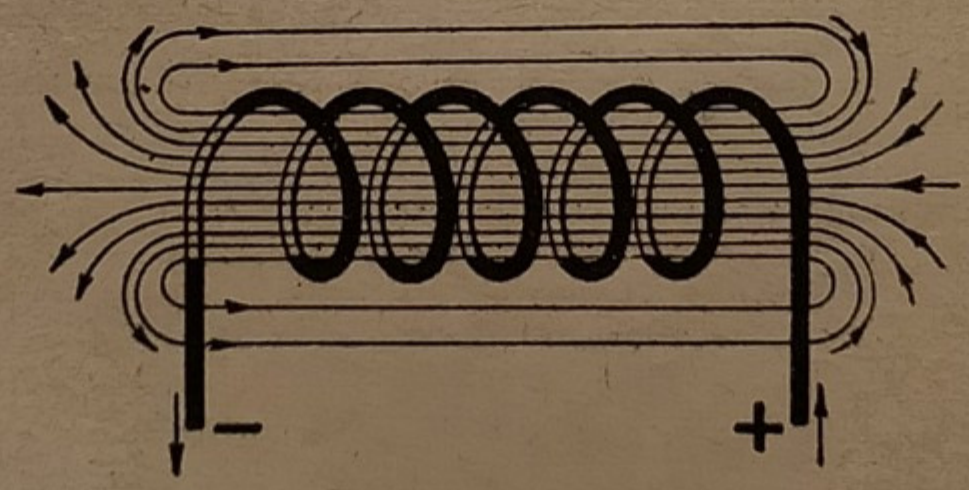


Fig. 81 - Campo magnetico di una spirale.

ESPERIMENTO. — Sospendendo un solenoide orizzontalmente in modo che esso possa girare liberamente esso si orizzonta subito da nord a sud come un ago calamitato. Se si avvicina ad esso un magnete od un altro solenoide, esso viene attratto o respinto come un ordinario ago calamitato.

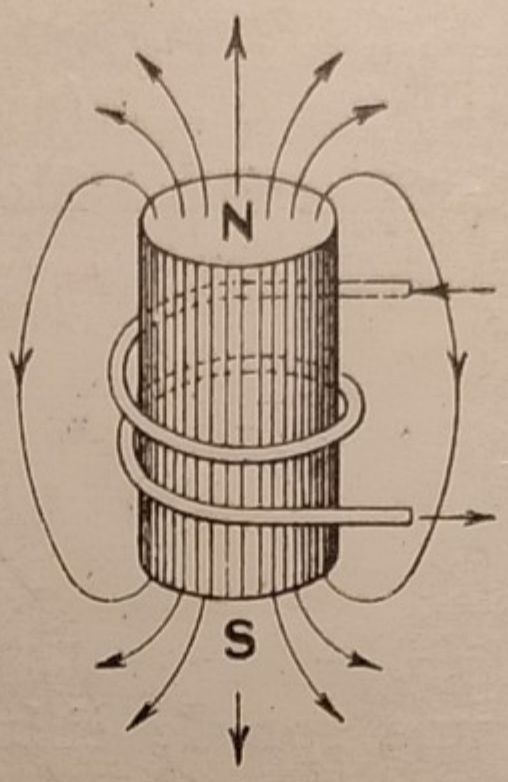


Fig. 82 - Direzione delle linee di forza di un elettromagnete.

La polarità di un solenoide si può stabilire colla seguente regola (Fig. 83):

Se si appoggia l'indice *della mano destra* sul filo di un solenoide nella direzione della corrente il polo nord è dalla parte del pollice.

56. Elettromagneti. — Mettendo un nucleo di ferro nel cavo di un solenoide, siccome il ferro ha la proprietà di aumentare le linee di forza (parag. 53) esso diventerà fortemente magnetico.

Un nucleo di ferro circondato da una spirale di filo isolato costituisce un elettromagnete.

Gli elettromagneti sono impiegati largamente nella pratica: dai campanelli, ai telegrafi, telefoni; dai più umili ap-

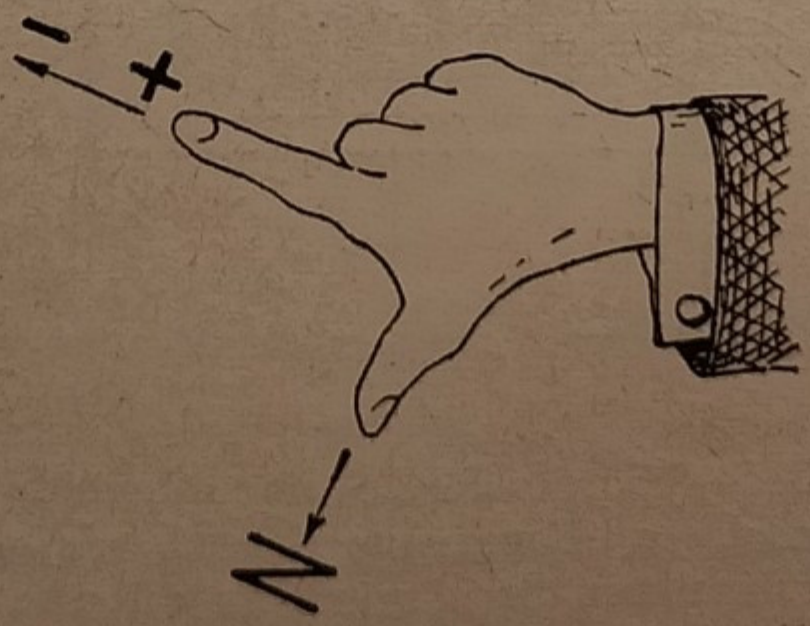


Fig. 83 - Metodo per determinare la polarità di un elettromagnete.

parecchi di laboratorio ed industriali, alle dinamo ed agli alternatori, gli elettromagneti hanno trovato la più vasta applicazione. Si intuisce che la forza di attrazione di questi apparecchi (e l'esperienza lo dimostra) cresce col crescere delle spire d'avvolgimento e degli ampère passanti; anzi lo stesso effetto di forza lo si può ottenere con molte spire e pochi ampère di corrente oppure con molti ampère e poche spire,

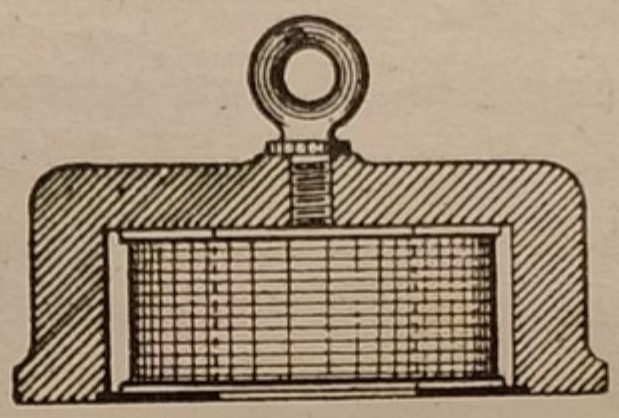


Fig. 84 - Elettromagnete a corazza per sollevare pesi di ferro.

purchè il prodotto del numero delle spire per quello degli ampère sia uguale. L'elemento principale quindi che determina la forza delle elettrocalamite è dato dal numero delle ampère-spire o ampère-giri.

Gli elettromagneti sono impiegati nella pratica con forme svariate ma specialmente colle seguenti: a ferro di cavallo; a corazza; a succhiamento. (Fig. 84-85).

Si dice *armatura* od *ancora* di un elettromagnete il pezzo di ferro — generalmente mobile — che viene attratto. Le forme succitate sono giustificate dal fatto che gli elettromagneti acquistano il massimo sforzo di attrazione quando il flusso magnetico (parag. 48) viene rinserrato completamente in un *circuito magnetico di ferro*, formato dal nucleo dell'elettromagnete e dalla sua ancora o armatura.

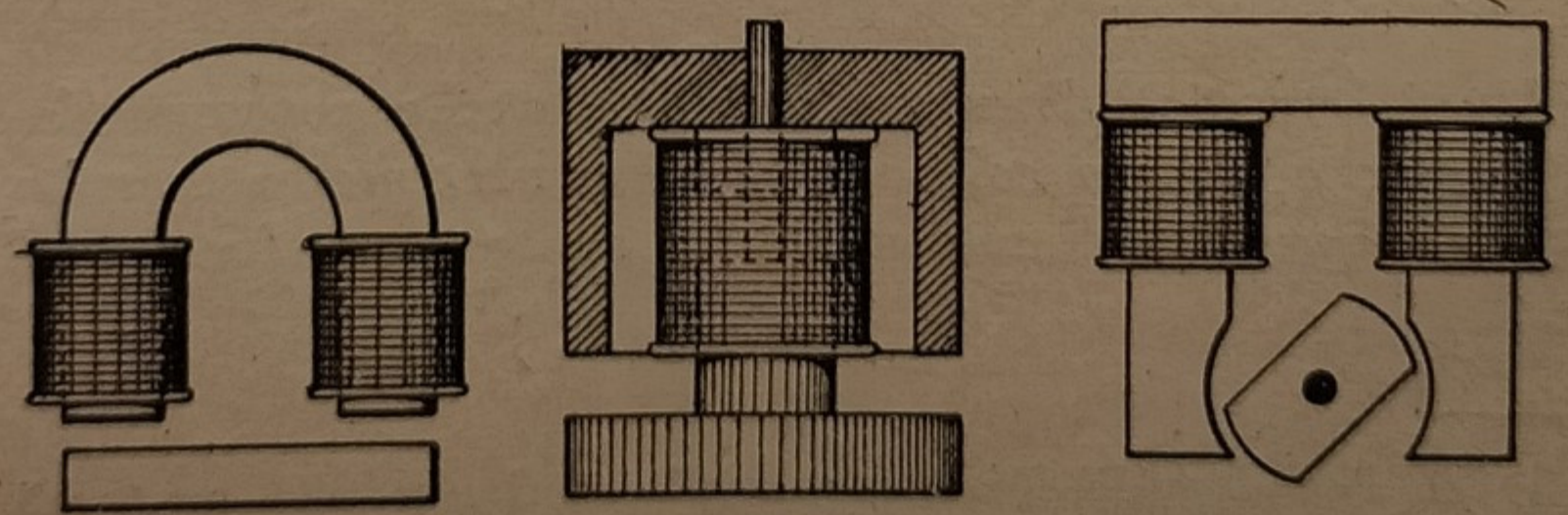


Fig. 85 - Forme diverse di elettromagneti.

Si dice *eccitazione* o *corrente eccitante* la corrente che circolando negli elettromagneti produce il campo.

I forti campi magnetici creati dagli elettromagneti offrono un mezzo semplice per magnetizzare le calamite permanenti di acciaio. Basterà avvolgere questi ultimi con del filo percorso da corrente continua e l'effetto sarà tanto più forte quanto più grande sarà il numero degli ampère-spire.

57. Campo magnetico di una spira e definizione della unità di corrente. — Supponiamo di avere un filo piegato a cerchio e percorso da corrente *i*. Evidentemente ogni elemento di filo sarà circondato da linee di forza ed al centro avremo un campo magnetico H diretto in senso perpendicolare al piano del cerchio. Tale campo è proporzionale allo sviluppo del cerchio ($2\pi r$), alla corrente *i*, ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza del filo (r^2). Al centro del cerchio avremo quindi:

$$H = K \frac{2\pi r i}{r^2} \text{ ossia } = K \frac{2\pi i}{r} \qquad (1)$$

Nel Congresso internazionale di elettricisti di Parigi nel 1881 era stato fissato di derivare tutte le misure prendendo come unità fondamentali il centimetro, il grammo ed il secondo (sistema C. G. S.). Di conseguenza è stato determinato di adottare come unità di forza la *dina* [1]) e come unità di intensità di corrente quella derivante dalla formola (1) nella quale sia K, *i* e *r* uguale a uno. Ne risulta:

$$H = 2\pi \quad \text{dine}$$

L'unità teorica di corrente è quella che percorrendo un filo piegato a circolo col raggio di un centimetro esercita su un polo magnetico di massa uno al centro, una forza di 2π *dine.*

---

(1) Si dice *dina* la forza capace di imprimere alla massa di un grammo l'accelerazione di un centimetro al secondo. Il peso di 1 gr. equivale a 981 dine.

Come unità pratica o ampère fu scelto un decimo della unità teorica. (Fig. 86).

Perciò: 1 Ampère $= 10^{-1}$ unità C. G. S.

1 unità C. G. S. = 10 ampère

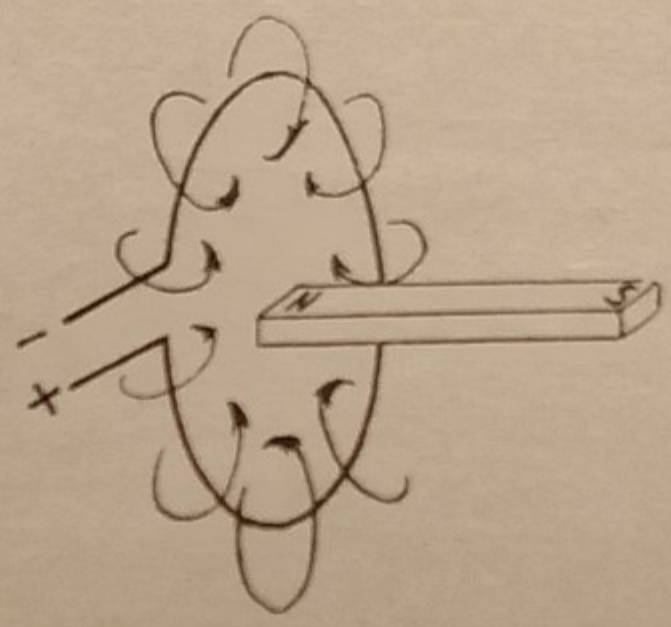


Fig. 86 - Campo magnetico di una spira.

Si deduce che in una matassa circolare assimilabile a una spira formata dalla riunione di N spire di raggio r percorse da una corrente di i ampère, la forza esercitata su di un polo magnetico di massa 1 posto al centro e perciò l'*intensità del campo*, è espressa:

$$H = F = \frac{2 \pi i N}{10 r} \text{ dine}$$

Per avere i grammi basterà dividere la forza F per 981.

58. Espressione del campo magnetico interno ad un solenoide. — Supposto di avere un solenoide o spirale tubolare lungo l *cm.* (senza ferro) e supposto che la sua lunghezza sia almeno 4 o 5 volte il diametro, l'intensità del campo magnetico in Gauss o linee per cmq. è dato dalle formole:

nelle regioni mediane dell'asse: $H = \frac{4 \pi N i}{10 l}$ (*a*)

nelle regioni vicine all'estremità: $H_1 = \frac{2 \pi N i}{10 l}$ (*b*)

dove N è il numero delle spire costituenti la spirale ed *i* la intensità della corrente in ampère.

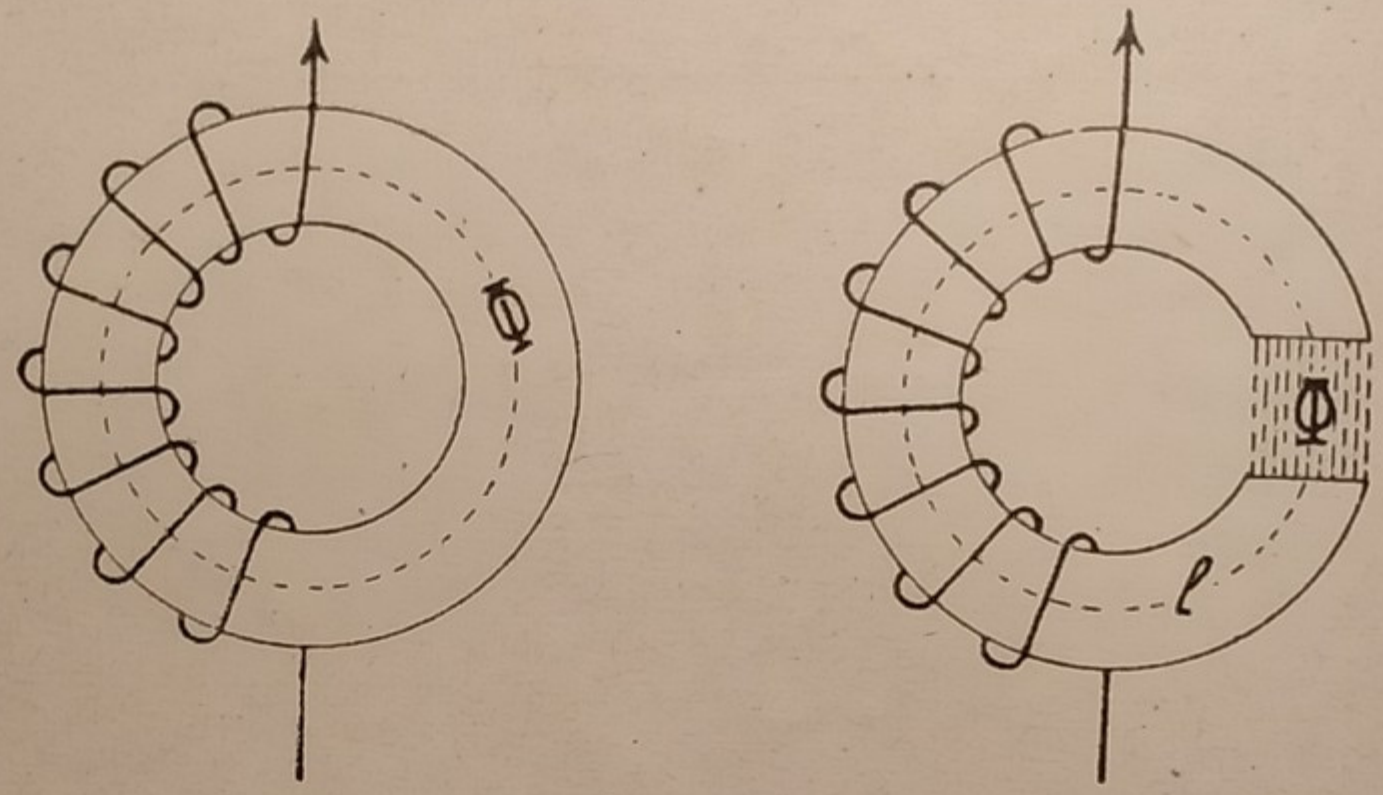


Fig. 87-88 - Circuiti magnetici ad anello con e senza interferri.

ESEMPIO. — Qual'è il valore del campo H interno ad un solenoide lungo 30 cm. con 200 spire percorse da 5 amp?

R. Esso sarà nelle regioni mediane:

$$H = \frac{4\ \pi\ .\ 200\ .\ 5}{10\ .\ 30} = 41.8 \text{ linee cmq. (gauss)}$$

Se il solenoide invece di essere diritto ossia cilindrico è piegato in modo da chiudersi (Fig. 87-88) (per esempio colla forma di un toro) il campo magnetico è dato dalla formola (a.)

Se nell'interno di un solenoide al posto dell'aria si mette un nucleo di ferro, questo ha la nota proprietà di attirare a sè e di aumentare il numero delle linee di forza dal valore di H al valore di B (vedi parag. 53) in ragione della permeabilità. L'intensità del flusso magnetico in unità C. G. S o Gauss nel nucleo di ferro è dato dalla formola:

$$B = \mu\ H \quad \text{ossia} \quad B = \frac{4\ \pi\ N\ i}{10\ l}\ \mu = \frac{1{,}25\ N.\ i}{l}\ \mu$$

Il prodotto 1,25 N*i* che entra in tutte le formole relative agli elettromagneti si dice *forza magneto motrice*.

Il flusso magnetico totale Φ essendo S la superficie in cmq. della sezione del nucleo di ferro sarà espresso da:

$$\Phi = \frac{S\ 4\ \pi\ N\ i}{10\ l}\ \mu = \frac{1{,}25\ S\ N\ i}{l}\ \mu$$

Il prodotto $\frac{N\ i}{l}$ rappresenta degli amp-spire per cm. di lunghezza di nucleo.

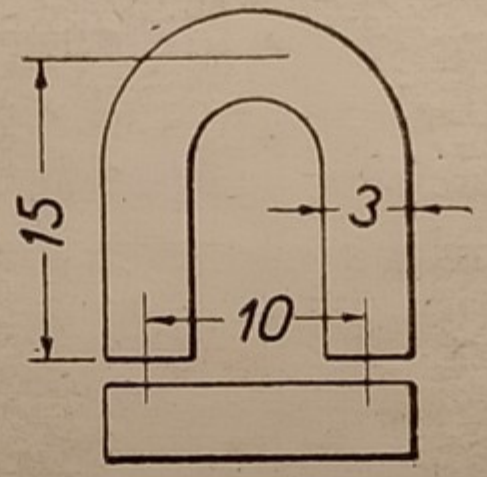


Fig. 89 - Elettromagnete.

Queste formole servono a calcolare gli elettromagneti e valgono per tutti quelli piegati in modo che il flusso magnetico forma un circuito chiuso di ferro, anche se l'avvolgimento è fatto sopra una porzione sola del nucleo di ferro. Se il circuito magnetico non è continuo nel ferro, ma contiene una soluzione di continuità anche piccolissima allora bisogna ricorrere alle formole del parag. 61.

ESEMPIO. — Qual'è il valore dell'intensità B e del flusso totale in un elettromagnete avente le dimensioni segnate nella figura 89, supposto che l'ancora sia attaccata ai poli e quale la forza portante dell'ancora?

Il nucleo di ferro è formato di ferro tondo del diametro di 3 cent, lungo 40 cent., ed avvolto con 300 spire di filo percorso da 5 Amp. L'ancora è formata da un ferro piatto della stessa sezione del ferro a cavallo, ed è lunga 10 cm.; perciò $l = 50$ cm.

R. Bisogna prima calcolare il valore del campo magnetico H (senza ferro) supposto che le spire siano uniformemente distribuite su tutto il circuito magnetico chiuso formato dalle branche dell'elettromagnete e dalla sua ancora ed avente una lunghezza complessiva di 50 cm.

$$H = \frac{4\ \pi \times 300 \times 5}{10 \times 50} = 37{,}68$$

Si ricorre alla tabella 12 del paragrafo 53 da dove si ricava che quando H è fra 28 e 52 il valore di μ per il ferro forgiato è 400 circa e quindi $B = 400 \times 37{,}68 = 15000$ circa. Essendo la sezione del ferro di 7,07 cmq. il flusso totale sarà $15000 \times 7{,}7 = 106050$ linee di forza.

Per quanto è detto al paragrafo 54 la forza portante sarà:

$$F = 2 \times 7{,}07 \frac{15000^2}{5000^2} = 14,\ 14 \times 4{,}5 = 63{,}62 \text{ Kg.}$$

59. Curve e tabelle di magnetizzazione. — In base a quanto si è detto nei paragrafi precedenti si sono formate delle tabelle e delle curve dette di *magnetizzazione* per le diverse qualità di ferro, ghisa, acciaio che si adoperano nella costruzione delle macchine elettriche. Le curve si ottengono portando in coordinate cartesiane come ascisse gli ampère-spire per cm. di lunghezza di nucleo e come ordinate i valori corrispondenti dell'induzione B, valori che si ottengono con metodi di laboratorio. (Fig. 90).

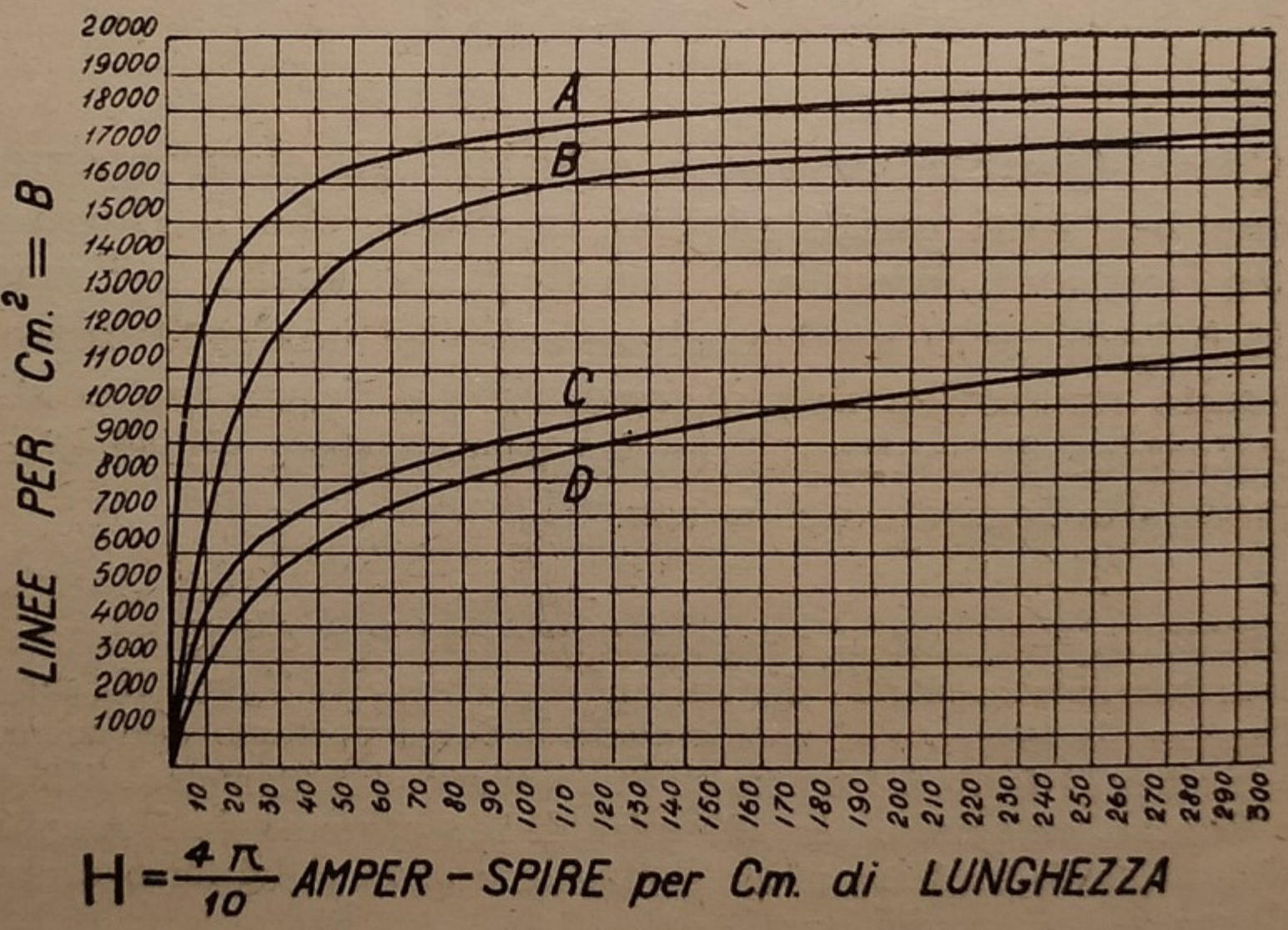


Fig. 90 - Curve di magnetizzazione.

A = curva del ferro dolce — B dell'acciaio — C della ghisa bianca — D della ghisa grigia.

Queiste curve variano a secomda della qualità del ferro ed il loro confronto dà l'idea della bontà delle medesime e della permeabilità. Per l'acciaio le curve sono molto varia-

bili, anche per lo stesso campione di acciaio, a seconda che la corrente magnetizzante è crescente o decrescente durante l'esperienza; le forti differenze delle curve dello stesso acciaio sono dovute al magnetismo residuo che rimane nel metallo.

Le curve servono per una rapida calcolazione delle amp-spire necessarie per ottenere un determinato valore di B se il circuito mag. è chiuso.

Servono anche a fare il confronto fra i materiali magnetici impiegati, nella costruzione delle macchine elettriche.

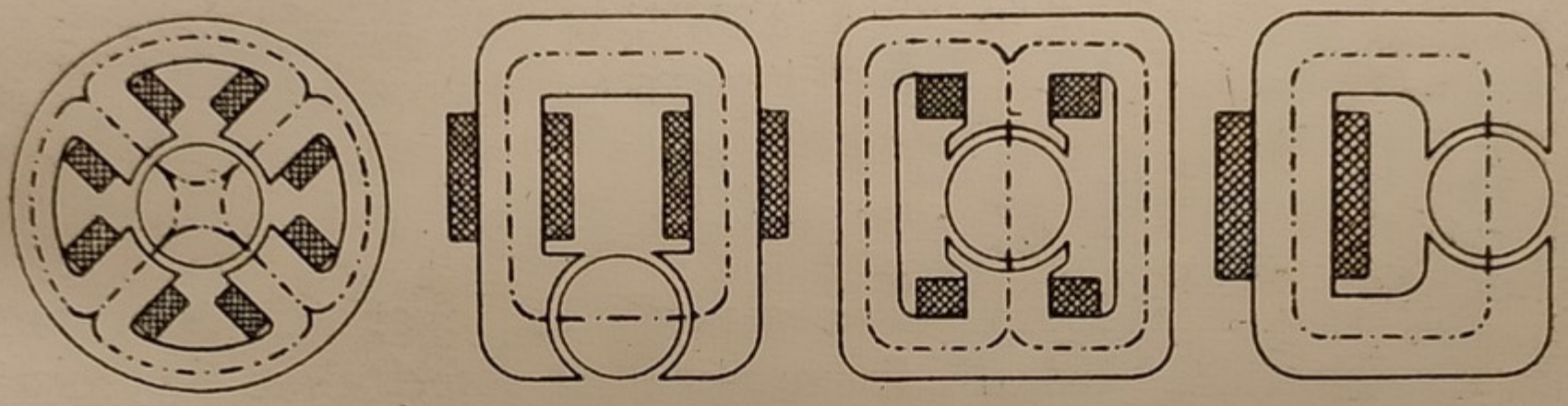


Fig. 91 - Forme di circuiti magnetici adottati per le dinamo.

60. Circuiti magnetici. - Legge di Ohm magnetica o di Hopkinson. — Ricordiamo che si dice *circuito magnetico* il percorso di un flusso magnetico e ricordiamo pure che un elettromagnete a ferro di cavallo colla sua ancora costituisce un circuito magnetico completamente di ferro o acciaio. Tale circuito si dice *chiuso nel ferro*. Nelle costruzioni elettromeccaniche di dinamo, alternatori, magneti di sollevamento ecc. si ha una serie svariata di circuiti magnetici complessi e quasi tutti *semichiusi*; cioè essi non sono costituiti totalmente di ferro ma contengono delle interruzioni di continuità o interspazi d'aria che si dicono *interferri*.

La fig. 91 rappresenta diversi tipi di circuiti magnetici per dinamo e per alternatori, tutti semichiusi.

Fra le diverse macchine elettriche solo i trasformatori hanno un vero *circuito magnetico chiuso*; anche i magneti di sollevamento possono talvolta ritenersi chiusi ma tutti gli altri contengono degli interferri fra la parte fissa e quella ruotante.

Per tutti i circuiti chiusi si può applicare la formola già menzionata che dà il flusso Φ di linee di forza:

$$\Phi = Bs = \mu Hs = \frac{1{,}25\ Ni}{l}\ \mu\ s \qquad (1)$$

dove B è l'induzione nel ferro; H la forza magnetica o campo; μ la permeabilità (per l'aria $\mu = 1$); N il numero delle spire e *i* l'intensità in ampère; *s* la sezione del nucleo del circuito magnetico in cmq.

Quest'ultima formola si può mettere sotto questa forma:

$$\Phi = \frac{1{,}25\ Ni}{\frac{l}{\mu\ s}} \qquad (2)$$

Sotto questa forma essa ricorda la legge di Ohm per circuiti elettrici. Infatti il numeratore costituisce la *forza magneto-motrice* (1,25 Ni) e il denominatore è formato da un termine che assomiglia a quello della resistenza elettrica in quanto esso è proporzionale alla lunghezza e inversamente proporzionale alla sezione. La resistenza specifica sarebbe in questo caso rappresentata dal termine 1 diviso μ. Da questa somiglianza di formole e per facilitare lo studio e l'applicazione ai fenomeni magnetici nelle macchine si è pensato di esprimere la formola (2) con una legge analoga alla legge di Ohm:

Il flusso magnetico Φ *che si forma in un circuito magnetico chiuso è proporzionale alla forza magneto motrice* (1,25 Ni) *ed inversamente proporzionale alla resistenza magnetica* R. Questa resistenza magnetica si chiama *riluttanza* ed è espressa dal valore:

$$R = \frac{l}{\mu\ s}$$

Il termine 1 : μ si dice *riluttività*.

Quindi la legge di Ohm magnetica si può riassumere nella formola generale:

$$\text{Flusso magnetico} = \frac{\text{forza magneto motrice}}{\text{riluttanza}}$$

e si può applicare cogli stessi concetti che si sono svolti colla legge di Ohm applicata ai circuiti elettrici.

Quando un circuito magnetico, è *complesso* cioè è formato da diverse parti fatte con materiali, lunghezze e sezioni diverse la riluttanza totale, supposto che le parti siano in serie fra loro, è la somma delle riluttanze R_1, R_2, R_3, ecc. cioè:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \ldots .$$

dove:

$$R_1 = \frac{l_1}{\mu_1 \, s_1} \qquad R_2 = \frac{l_2}{\mu_2 \, s_2} \qquad R_3 = \frac{l_3}{\mu_3 \, s_3} \text{ ecc.}$$

Se nel circuito magnetico complesso vi è un interferro allora si fa $\mu = 1$ e per l si mette lo spessore dello strato d'aria o interferro.

Se le riluttanze R_1, R_2, R_3, sono in parallelo fra loro la riluttanza totale è data, come per le resistenze in parallelo da:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \ldots .}$$

61. Calcolazione dei circuiti magnetici. — I circuiti magnetici delle dinamo, motori, alternatori, ecc. sono quasi sempre circuiti complessi di ferro lamellare, ferro forgiato, ghisa, acciaio, aria. Nelle calcolazioni si presenta quasi sempre il problema: dato un flusso Φ di linee di forza, cercare gli ampère-spire necessarie per ottenere il detto flusso con determinate qualità di materiali e determinate sezioni e lunghezze di nuclei e interferri.

In questi casi si stabiliscono in via approssimativa con schizzi o disegni le dimensioni del circuito magnetico nelle sue varie parti. La sezione dei nuclei si calcola in base ai seguenti valori di B:

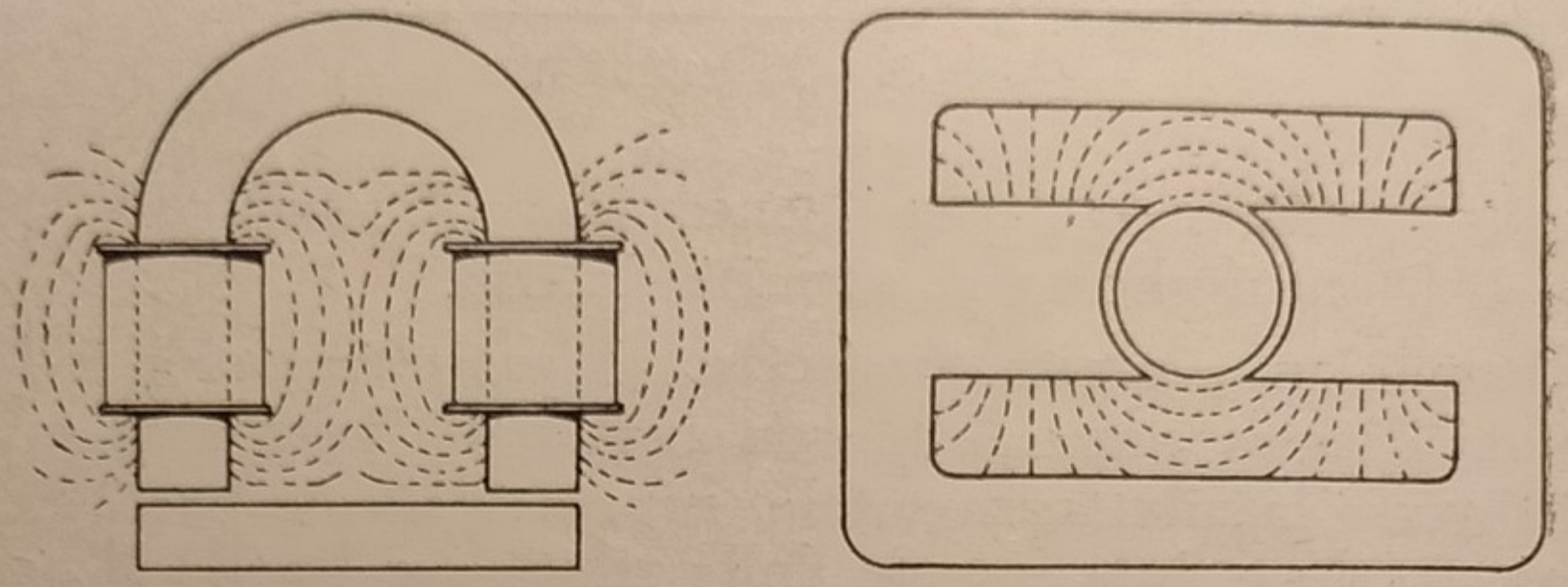


Fig. 92 - Le dispersioni di flusso in circuiti magnetici.

da 6000 a 12000 pei nuclei di ferro lamellare
da 12000 a 20000 nei denti degli indotti delle dinamo
da 2000 a 6000 pei nuclei di ghisa grigia
da 3000 a 8000 pei nuclei di ghisa malleabile
da 10000 a 15000 pei nuclei di ferro forgiato o di acciaio fuso per elettromagneti.

In altri casi di applicazione pratica delle formole è dato un problema contrario: date le dimensioni delle parti di un circuito magnetico e la forza magneto motrice trovare il flusso Φ.

Per facilitare i calcoli in tali casi invece di adoperare le curve di magnetizzazione si ricorre a dette tabelle derivate dalla formola (1) del paragrafo precedente. Da essa si cava:

$$1{,}25 \frac{Ni}{l} \mu = B$$

Questa formola esprime: che per ogni numero di ampère-spire per centimetro di lunghezza del circuito magnetico corrisponde un determinato valore di B. Il valore $\frac{Ni}{l}$ si dice anche ampèr-spire specifici. Una delle tabelle più impiegata per calcoli approssimativi è quella che segue. (Tabella 13).

Nell'applicazione di queste tabelle bisogna tener presente che il flusso che si forma nella spirale di un elettromagnete non percorre interamente la via segnata dai nuclei nelle parti fuori della spirale ma una piccola parte sfugge dai nuclei e si rinchiude nell'aria. (Fig. 92). Si chiama *flusso di dispersione*.

Perciò nella calcolazione degli ampère-spire bisogna aumentarli di una certa percentuale per tener conto del flusso disperso e non utilizzato. La percentuale varia dal 10 a 20 per cento. Nei trattati di costruzione delle macchine elettriche si trovano formole speciali per la calcolazione dei flussi dispersi.

TABELLA N. 13 — Valori della induzione B (linee per cmq) e degli ampère-spire per centimetro di lunghezza di nucleo

B (linee per cmq)	AMPÈR-SPIRE per cm di lunghezza $\left(\frac{N\ i}{l}\right)$			
	Aria	Ferro lamellare	Ferro fucinato	Ghisa grigia
1000	800	0.15	0.9	1
2000	1600	0.80	1.2	2
3000	2400	0.50	1.5	3
4000	3200	0.65	1.9	4
5000	4000	0.9	2.2	8
6000	4800	1.1	2.5	17.2
7000	5600	1.35	2.9	33.6
8000	6400	1.65	3.3	64
9000	7200	2.0	4	101.6
10000	8000	2.4	5	150.4
11000	8800	3.0	6.5	233
12000	9600	3.9	8.5	—
13000	10400	5.0	12	—
14000	11200	7.0	17	—
15000	12000	12.5	28.5	—
16000	12800	35.0	52	—
17000	13600	88	105	—
18000	14400	138	200	—
19000	15200	210	350	—
20000	16000	—	—	—

Dalla tabella si può ricavare il valore di μ colla formula:

$$\text{Permeabilità } \mu = \frac{B}{1{,}25 \text{ Amp-spire per cm.}}$$

Dalla tabella N. 13 si rileva che gli ampèr-spire necessarie per un cent. d'aria sono enormemente più grandi di quelli per i materiali magnetici.

Applicazioni numeriche:

1. Calcolare il flusso magnetico di un anello chiuso di ferro fucinato che ha un diametro medio di 20 cm., una sezione di 12 cmq. ed è avvolto con 300 spire di filo percorso con una corrente 6 Amp.

R. Essendo la lunghezza dell'anello di $20\ \pi = 62{,}8$ cm. il numero degli amp-spire per centimetro è:

$$\frac{300 \times 6}{62{,}8} = 28$$

Per mezzo della tabella, si trova che a questo numero corrispondono circa 15000 linee di forza per cmq. (B) Il flusso totale nel ferro sarà:

$$15000 \times 12 = 180000$$

2. Calcolare il numero delle amp-spire per lo stesso anello in modo d'avere 120.000 linee di flusso.

R. L'induzione B nel ferro sarà:

$$\frac{120000}{12} = 10000 \text{ unità}$$

Ora dalla tabella risulta che a questo valore di B per il ferro fucinato corrispondono 5 Amp-spire al cm. Per tutta la lunghezza dell'anello si dovranno quindi avere $5 \times 62{,}8 = 314$ ampère-spire, ossia, 1,05 ampère nelle 300 spire.

3. Calcolare il numero delle amp-spire per lo stesso anello di ferro fucinato supposto che sia interrotto il ferro con un interspazio d'aria (interferro) di 0,5 cent., e supposto che il flusso sia di 120.000 linee.

R. Essendo l'induzione come nel precedente esempio di 10.000 linee cmq. il numero delle amp-spire specifiche risulterà secondo la tabella 13:

Amp-spire per il circuito magnetico di ferro	5
Amp-spire per l'interferro d'aria	8000

La forza magnetomotrice in amp-spire totale sarà:

Per il ferro	62,8	×	5 =	314
Per l'aria	8000	×	0,5 =	4000
			Totale	4314

Esercizi da risolvere

1. Un anello di ferro del diam. di 30 cm. e colla sezione di 16 cmq. porta 800 spire eccitatrici. Calcolare la corrente necessaria per ottenere un flusso di 500.000 linee quando il circuito magnetico è chiuso e quando contiene un interferro di 0,5 cm.

2. Un circuito magnetico è composto di tre tronchi: 1. di ghisa lungo 20 cm.; sezione 25 cmq. - 2. di ferro fucinato lungo 40 cm. e sezione di 10 cmq. - 3. di aria lungo 1 cm. e sezione di 15 cmq.

Calcolare gli amp-spire per ottenere un flusso di 120.000 linee.

3. Un induttore di dinamo della forma 2.a e 4.a della figura 91 è formato da un nucleo di ghisa lungo 400 cm. e della sezione di 200 cmq. Vi sono due interferri di 300 cmq. di superficie dello spessore di 0,4 cm. La riluttanza dell'indotto è trascurabile. Il coefficiente di dispersione del flusso è 1,5.

Calcolare la corrente di eccitazione supposto che siano avvolte 300 spire per ottenere B = 2000 — 4000 — 6000 — 8000 linee per cmq. nell'interferro.

Da questi esempi risulta che la riluttanza degli interferri anche sottili è molto grande in confronto di quella dei circuiti in ferro. Perciò talvolta in calcoli approssimativi si tien conto solo degli spazi d'aria.

62. Forza portante degli elettromagneti. — La forza portante degli elettromagneti è data dalle stesse formole indicate per la forza attrattiva dei magneti (parag. 54). Ossia:

$$F = \frac{B^2 \, s}{25000000}$$

dove F è la forza in Kg.; *s* la sezione dei nuclei in cmq. Il calcolo degli ampèr--spire si fa secondo le formole dei paragrafi precedenti.

La forza portante degli elettromagneti varia fra 8 e 10 Kg. per cmq.; l'induzione B si calcola, se i nuclei sono di ferro od acciaio, fra 15000 e 16000 linee per cmq. Ma per tener conto del contatto imperfetto fra i poli e l'ancora e che rappresenta una forte riluttanza al passaggio del magnetismo, bisogna essere larghi nella valutazione della forza magneto-motrice (amp-spire); bisogna cioè calcolare che nel circuito magnetico vi sia un interferro di 0,5 a 1 mm. e perciò per induzioni normali di 15 a 16 mila linee bisogna aggiungere da 600 a 1200 amp-spire di forza magneto-motrice in più di quella necessaria per *creare il flusso magnetico nel nucleo di ferro.*

Ottenuti gli amp-spire necessari per un dato effetto in un elettromagnete occorre di stabilire l'intensità in ampère, il numero delle spire

ed il diametro del filo. Le soluzioni sono molte e bisogna procedere per tentativi. Si disegna il nucleo di ferro e si fissa il numero delle spire; si deducono gli ampère e si fissa provvisoriamente la sezione del filo di rame in base a 2-3 ampère per mmq. Si trova il diametro esterno del filo corrispondente tenendo conto che la copertura isolante ha circa 0,25 mm. di spessore. Quindi si calcola l'altezza e lo spessore dell'avvolgimento e si guarda se vi è spazio sufficiente sul nucleo. Si calcola la lunghezza sviluppata del circuito, la sua resistenza ohmica e si verifica se, data la tensione disponibile si ottiene la intensità voluta. Se l'intensità non corrisponde o se non vi è spazio sufficiente si rifà il tentativo di calcolazione.

Se l'elettromagnete deve rimanere molto tempo sotto corrente si calcola che la superficie esterna dell'avvolgimento di filo sia sufficiente a smaltire il calore che si sviluppa. Perciò occorrono 25 cmq. di superficie per ogni watt consumato dall'avvolgimento per effetto Joule.

ESEMPI. — 1. Calcolare la forza portante e gli amp-spire magnetizzanti di un elettromagnete come alla Fig. 93 supposto una induzione di 16.000 linee e un coefficiente di dispersione del 10 per cento.

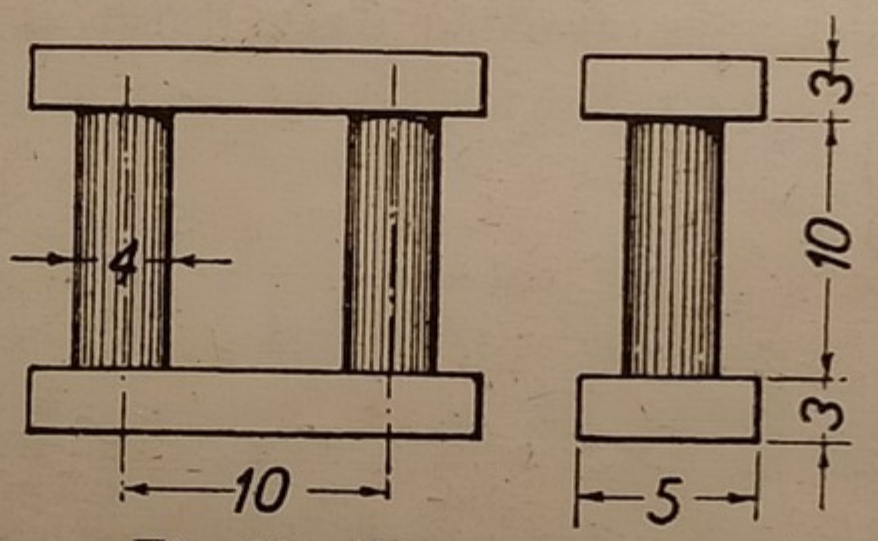


Fig. 93 - Elettromagnete.

Dati: Sezione di ogni colonna: $= \frac{\pi\ d^2}{4} = 12{,}56$ cmq.

Sezione dei due gioghi $3 \times 5 = 15$ cmq.

R. Applicando la solita formola per ogni polo:

$$F = \frac{B^2}{25\ 10^6}\ s = \frac{256}{25}\ 12.56 = 128{,}6\ \text{Kg.}$$

e pei due poli Kg. 257,2.

L'induzione B è di 16000 linee nei nuclei cilindrici, mentre nei gioghi (essendo di maggior sezione) risulta di 13500.

La lunghezza dei circuiti magnetici è di 10×2 per le colonne e 2×10 circa per i due gioghi.

La forza magnetizzante in amp-spire per cm. è, secondo la tabella 13, di 52 per le colonne e 15 per i gioghi. In totale avremo:

$$52 \times 20 + 15 \times 20 = 1340 \text{ amp-spire}$$

A questo valore bisogna aggiungere almeno 600 amp-spire per vincere la riluttanza dei giunti e poi il 10 per cento per tener conto delle dispersioni di flusso. Perciò la forza magnetomotrice totale dovrà essere:

$$(1340 + 600)\ 1{,}10 = 2134$$

che si può arrotondare in 2500 ossia 1250 spire per colonna.

L'avvolgimento può avere infinite soluzioni, ma se noi fissiamo la sezione del filo e gli ampère in ragione di non più di 2 a 3 amp. per mmq. (perchè non si abbia un riscaldamento esagerato) e la tensione, allora possiamo arrivare ad una unica soluzione. Il problema si può risolvere per tentativi od algebricamente.

Nel nostro caso come primo tentativo fissiamo 1 amp. di intensità di corrente; 2500 spire; 50 volt la tensione disponibile. La sezione del filo sia fissata 1 : 2 = 0,5 mmq. equivalente a filo di 0,8 di diam. nudo per cui, calcolando uno spessore di isolante di 0,25 si avrebbe un diametro di filo coperto di 1,3 mm. Ogni colonna del nostro elettromagnete essendo alta 100 mm. ogni strato dovrà avere 100 : 1,3 = 77 spire. Gli strati saranno 1250 : 77 ossia 16. Ogni spira essendo in media lunga m. 0,19, la lunghezza totale del filo sarà 2500 × 0,19 = 475 metri. Il filo ha (secondo le tabelle) 16 ohm. Essendo le due spirali d'avvolgimento in serie fra loro, la resistenza totale sarà 16 × 2 = 32 ohm. L'intensità di corrente sarà 50 : 32 = 1.56 amp. cioè un po' maggiore di quella strettamente necessaria. Si può fare un secondo tentativo con filo di 0,4 mmq.

63. Isteresi magnetica. — Quando si sottopone un nucleo di ferro ad una forza magnetizzante crescente (crescendo cioè la corrente di eccitazione) anche l'induzione B cresce. non proporzionalmente, ma secondo la curva di magnetizzazione segnata col tratto OA della fig. 94. Se arrivati al punto A si diminuisce la corrente eccitante, il valore dell'induzione B non ripassa per gli stessi valori della curva OA ma mantiene valori più elevati poichè il ferro è rimasto magnetizzato in parte permanentemente. Quando la corrente eccitante è diventata zero il valore B sarà OB_1 (*magnetismo remanente*).

Per smagnetizzare il nucleo bisogna far passare una corrente in senso inverso di prima.

Supponiamo di far crescere gradatamente questa corrente invertita fino a raggiungere una magnetizzazione A_1 uguale

ma di segno contrario a quella che il ferro aveva in A. Infine torniamo a far decrescere la corrente: la induzione B seguirà la curva A_1 B_{11} C_1 A. Avremo in tal modo compiuto un *ciclo magnetico*.

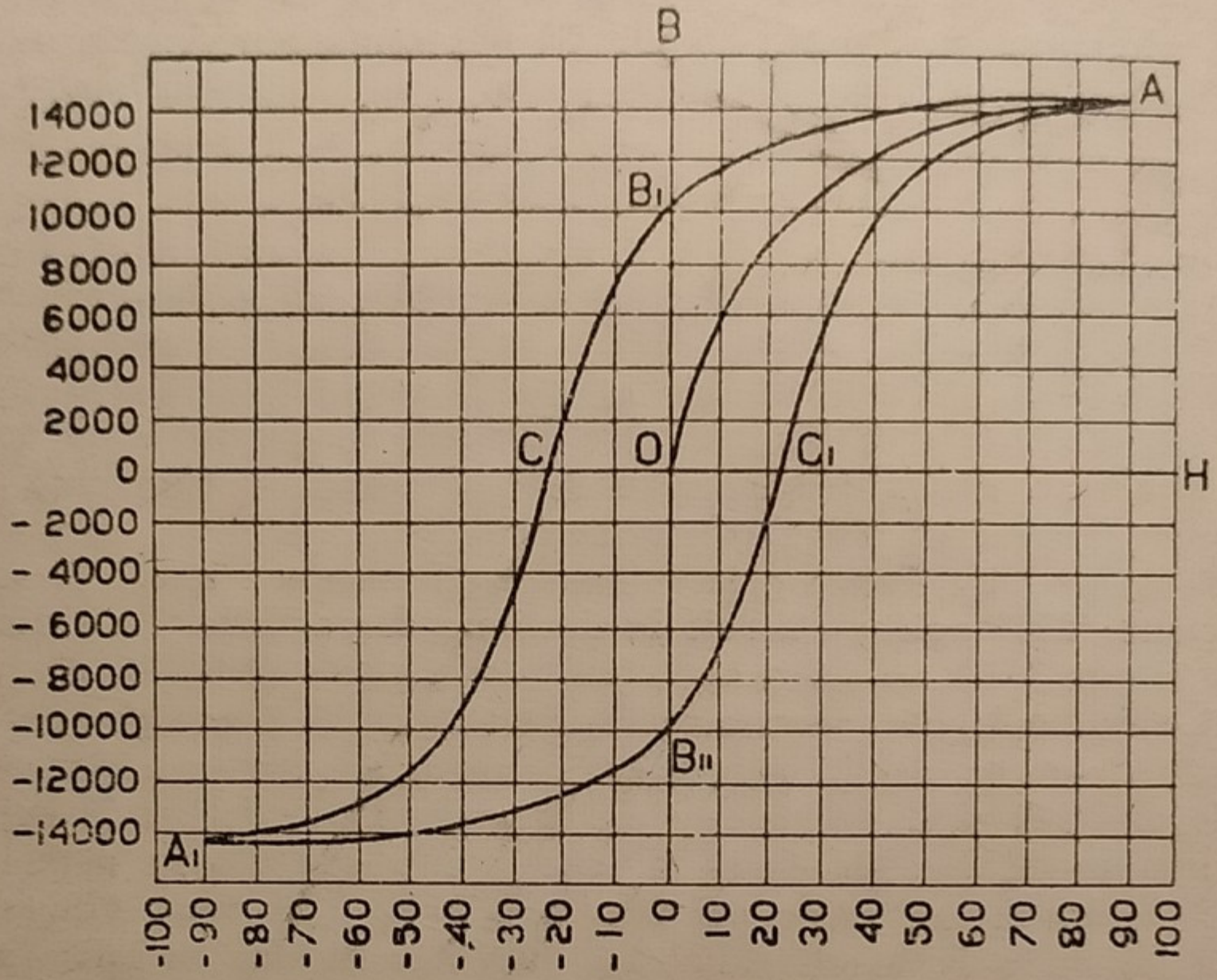


Fig. 94 - Ciclo di magnetizzazione.

Per compiere questo ciclo si è dovuto spendere dell'energia elettrica nel circuito di eccitazione; ed infatti se al nucleo vien fatto compiere una serie continuata di cicli periodici di magnetizzazione alternativamente in senso contrario si osserva un consumo di energia.

Questo fenomeno si dice *isteresi*. L'isteresi è la conseguenza di un attrito molecolare che le particelle di ferro trovano nell'orientarsi sotto l'azione della corrente variabile in senso alternativamente contrario.

L'isteresi rappresenta una perdita di energia in tutti quei nuclei delle macchine elettriche che sono sottoposti a cicli di magnetizzazione alternativamente in senso opposto. In queste condizioni il ferro si riscalda. A tale perdita ed a tale riscaldamento sono soggette le armature di ferro delle dinamo, i nuclei degli indotti degli alternatori, i nuclei dei trasformatori, ecc.

Le perdite d'isteresi sono piccole nel ferro dolce ossia scevro di carbonio; crescono molto nell'acciaio a sensibile tenore di carbonio. Si adoperano nella costruzione dei nuclei dei trasformatori delle lamiere di ferro-silicio (contenenti dal 3 al 4% di silicio) o lamiere di ferro legato le quali hanno una perdita per isteresi minore di quelle di ferro dolce.

Nella tabella N 14 sono indicate le perdite watt per ogni chilogrammo di ferro e per 50 cicli al 1".

Le perdite per isteresi variano in ragione della 1,6 potenza di B; ma computando anche le perdite per le correnti di Foucault si può dire che *le perdite nei nuclei lamellari variano in ragione del quadrato di B*. Le perdite stesse sono, entro certi limiti, proporzionali al numero dei cicli o periodi di magnetizzazione alternativa. Nella tabella i valori si riferiscono alle lamiere sottili poichè solo con esse si costruiscono i nuclei magnetici sottoposti a variazioni della forza magnetizzante.

TABELLA N. 14 — Perdite di isteresi nei nuclei lamellari in watt per ogni chilogrammo

B	Lamiere ordinarie di ferro dolce		Lamiere con 1% di silicio 0,5	Lamiere con 3% di silicio 0,35
	Spessore 0,5	Spessore 0,35		
5000	1.05	0.80	0.85	0.4
10000	3.30	2.58	2.90	1.36
11000	3.90	3.10	3.50	1.65
12000	4.60	3.75	4.15	2.00
13000	5.32	4 60	4.95	2.35
14000	6.15	5.63	5.90	2.75
15000	7.10	6.40	6.96	3.50

64. Energia dei campi magnetici. — I campi magnetici ed i flussi interni ed esterni degli elettromagneti rappresentano una certa quantità di energia allo stato potenziale.

Se si allontanano due poli di nome contrario di due magneti bisogna naturalmente eseguire un certo lavoro; l'energia corrispondente la si ritrova in un aumento del magnetismo

delle due calamite. Se invece lasciamo avvicinare gli stessi poli di nome contrario si sviluppa del lavoro a spese del magnetismo delle due calamite.

Per creare il campo magnetico intorno ai fili percorsi da corrente, oppure quello di un anello di ferro, quello di un elettromagnete di sollevamento, di una dinamo, ecc., bisogna spendere, a mezzo del circuito di eccitazione, una certa quantità di energia; viceversa interrompendo la corrente eccitante l'energia magnetica accumulata nello spazio oppure nel ferro, interferro, ecc., viene restituita al circuito sotto forma di una certa *quantità di corrente inerziale* ed una certa tensione media.

Se l'interruzione è rapida, la corrente è breve e la tensione molto alta; viceversa se la interruzione è lenta la corrente è di durata più lunga e la tensione più bassa. Però la quantità di energia è la stessa nei due casi.

Se invece di interrompere un circuito contenente un campo magnetico (per esempio i circuiti di macchine, di dinamo, alternatori, ecc.) lo si chiude in corto circuito, l'energia magnetica accumulata *od inerziale* viene restituita al circuito sotto forma di una intensa corrente la quale continua a circolare per un tempo apprezzabile finchè si esaurisce sulla resistenza ohmica, trasformandosi in calore.

Questi concetti sono da tenersi presenti dagli elettricisti perchè possano rendersi conto degli effetti particolari, talvolta pericolosi che si verificano nella interruzione dei circuiti di macchine o nei corti circuiti.

Riferendoci ai ragionamenti e notazioni del parag. 54 nell'interferro di un circuito magnetico di spessore di d cm. l'energia accumulata è data dalla forza F fra le due faccie di attrazione moltiplicata per la distanza d:

$$W = \frac{S\ d}{8\ \pi} B^2 \text{ erg.}$$

$$(1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ joule})$$

In generale un campo in aria avente una forza magnetizzante H e una superficie S rappresenta un'energia di:

$$W = \frac{S\ H^2}{8\ \pi} \text{ erg}$$

65. Azioni elettrodinamiche fra correnti o fra correnti e campi magnetici. — Le azioni elettrodinamiche di cui al presente paragrafo si riferiscono alle forze ed ai movimenti che si sviluppano tra fili o tra spirali percorsi da correnti od in presenza di campi magnetici. Esse furono particolarmente studiate dal fisico *Ampère*.

Esaminiamo diversi casi che hanno importanza per le applicazioni pratiche:

1. Due correnti parallele se sono dirette nello stesso senso, si attraggono; se dirette in senso contrario si respingono. (Figg. 95 e 96).

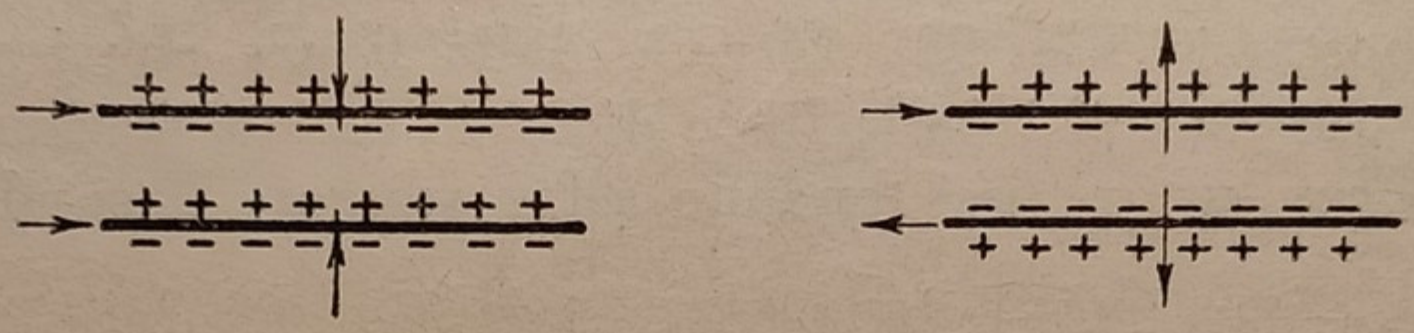


Fig. 95-96 - Attrazione e ripulsione di due correnti parallele.

Infatti facendo una sezione del flusso intorno ai fili con un piano passante pei due fili e segnando con + e — le polarità delle linee di forza, si riscontra che tra i due fili esistono come tante piccole calamite che sono di opposta polarità nel caso della fig. 95 od uguale nel caso della fig. 96.

Il fenomeno succede anche se le due correnti sono alternate, colla stessa frequenza e appartenente allo stesso generatore. La forza che si esercita fra due conduttori (brevi) paralleli è proporzionale al prodotto della loro lunghezza per le intensità delle correnti diviso per il quadrato della distanza (Legge di Ampère). La forza, nel caso di due conduttori paralleli molto lunghi è espressa dalla formola approssimata:

$$P = \frac{2 \times I_1 \times I_2}{d} \times 10^{-8}$$

in cui P è la forza in Kg. per ogni centimetro di lunghezza I_1 e I_2 le intensità in ampère *d* la distanza in cm. fra i fili.

2. Correnti inclinate tendono a disporsi parallelamente. (Fig. 97).

Dalla fig. in cui sono segnate le polarità delle linee di forza sezionate, risulta il movimento che tendono a prendere i due conduttori in relazione alla direzione della corrente.

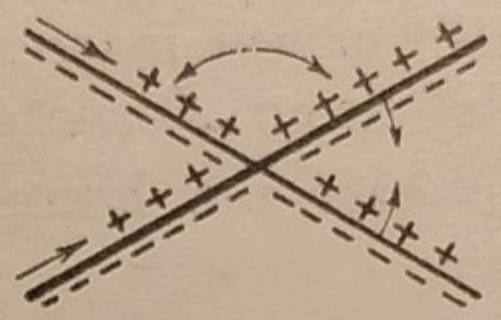


Fig. 97 - Due correnti inclinate tendono a mettersi parallele.

3. Se il circuito di due conduttori paralleli fissi vien chiuso da un conduttore mobile o scorrevole tra essi, questo tenderà a spostarsi (Fig. 98). Si vede dalla figura che i piccoli magneti rappresentati dalle linee di forza sezionate, comprese fra i due conduttori fissi tendono a far scorrere il conduttore mobile.

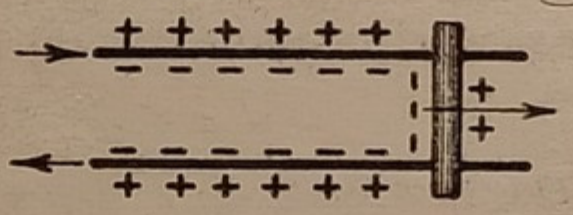


Fig. 98 - Un conduttore mobile su due rotaie tende ad allontanarsi.

Un'applicazione di questo fatto lo si ha nel fenomeno spesso osservato che gli archi voltaici (che rappresentano conduttori mobilissimi) tra due conduttori paralleli: essi si muovono secondo una certa direzione. Se i due conduttori sono inclinati l'arco prende la forma come se fosse soffiato (Figura 99).

Fig. 99 - L'arco voltaico fra due carboni inclinati è spinto in fuori.

4. Un solenoide elastico di filo percorso da corrente tende a schiacciarsi. (Fig. 100).

Ciò risulta evidente perchè ciascuna spira si comporta rispetto a quella adiacente come un filo parallelo con ugual direzione di corrente. Lo schiacciamento delle spirali di filo

lo si osserva spesso durante i corti circuiti occasionali nelle linee in cui sono inserite.

5. Se un filo è piegato in forma di spira o di spirale ed è libero di muoversi, allorchè è percorso da una corrente continua esso si comporta come un magnete e cioè esso viene attratto, respinto o fatto ruotare da un altro magnete.

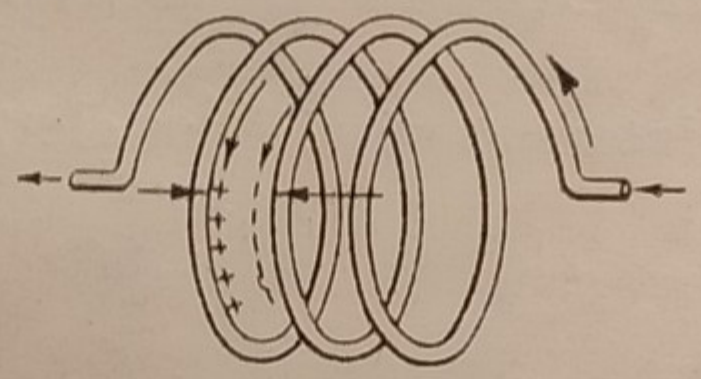


Fig. 100 - Una spirale tende a schiacciarsi.

Esso volge il suo asse magnetico in direzione nord-sud sotto l'influenza del magnetismo terrestre.

6. Un filo percorso da una corrente continua posto in un campo magnetico tende a muoversi trasversalmente tagliando

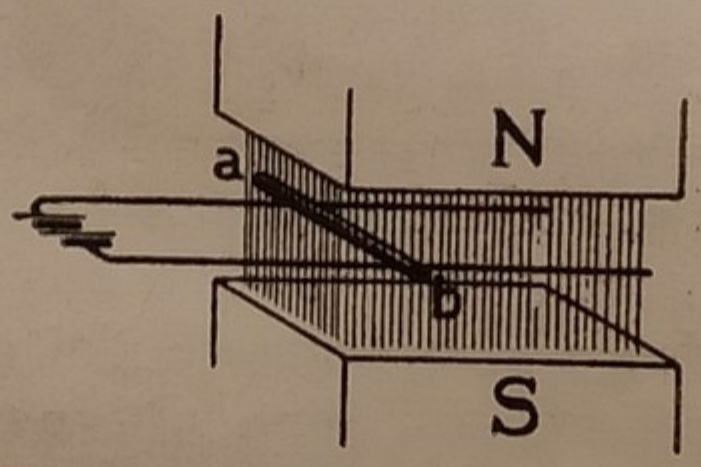


Fig. 101 - Un filo percorso da corrente posto in un campo magnetico si muove.

le linee di forza in un senso perpendicolare con una forza che è proporzionale al flusso tagliato ed alla corrente nel filo. (Vedi fig. 101-102).

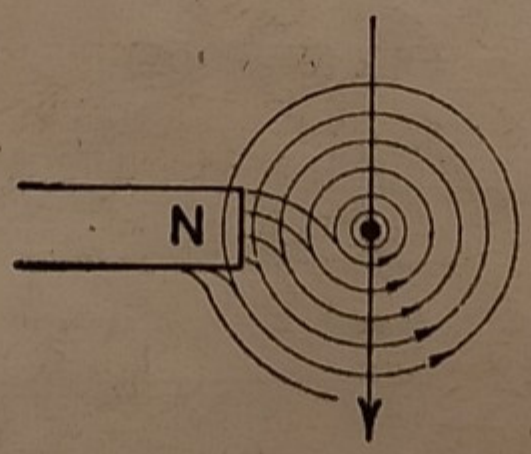


Fig. 102 - Spostamento di un filo sotto l'azione di una calamita.

Un esempio di questo movimento lo si ha nei fili di avvolgimento dell'armatura dei motori a corrente continua.

Ogni filo è spinto a muoversi nel campo magnetico che trovasi nell'interferro della macchina trascinando il nucleo in rotazione. (Fig. 103).

Così pure se si forma un arco voltaico (conduttore assai mobile) in un campo magnetico esso sarà spinto fuori rapidamente. Su questo principio sono fondati i soffiatori magnetici per interrompere rapidamente gli archi voltaici che si manifestano allorchè si apre un circuito con forte intensità e tensione. In questi interruttori vi è un elettromagnete a ferro di cavallo che soffia l'arco voltaico in senso perpendicolare alle linee di forza magnetiche. (Fig. 104).

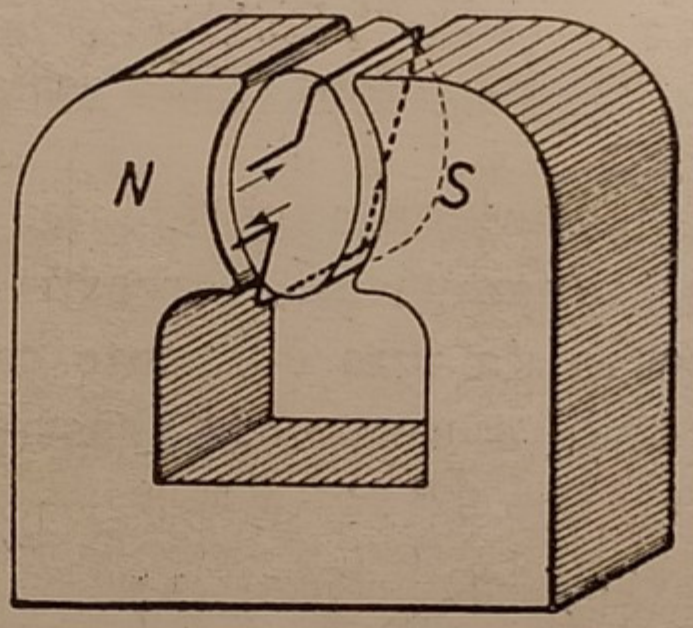


Fig. 103. - Schema di motore.

Gli effetti di forza e movimento dei casi 1-2-3-4 valgono anche se le correnti nei fili sono alternate colla stessa frequenza e appartenenti alla stessa sorgente di energia.

Se nel caso 6 la corrente è alternata il filo tende a star fermo.

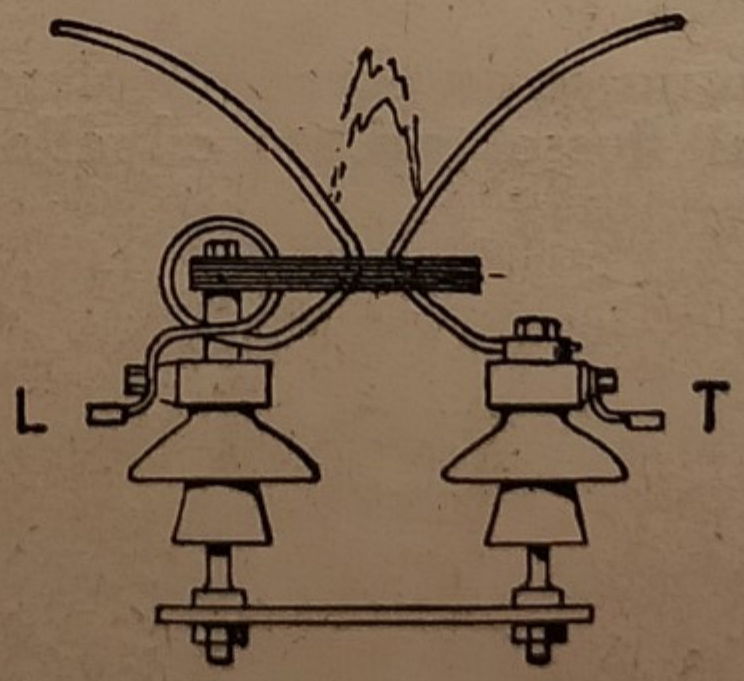


Fig. 104 - Soffiatore magnetico per parafulmini a corni.

Se ad una lampada ad arco a corrente continua si avvicina un polo magnetico (Fig. 105), l'arco viene ripulso per-

pendicolarmente alle linee di forza. Se la lampada è a corrente alternata l'arco viene ripulso alternativamente a destra ed a sinistra della calamita e tende a formare un disco brillante. (Fig. 106).

66. Espressione della forza agente sopra un filo posto in un campo magnetico. — Un filo lungo *l* centimetri *posto* in un campo magnetico di intensità H e percorso da una cor-

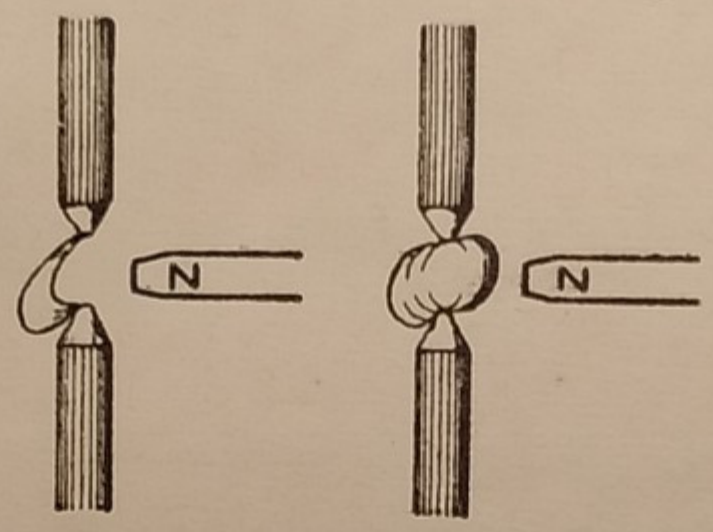


Fig. 105-106 - Soffiamento di un arco voltaico a corrente continua e alternata con un magnete.

rente *i*, è sollecitato a muoversi perpendicolarmente al flusso di linee (come nella fig. 101) con una forza data dalle formole:

$$P = \frac{l\, i\, H}{10} \text{ dine}$$

oppure:

$$P = \frac{l\, i\, H}{9810000} \text{ chilogrammi}$$

ESEMPIO. — Nei motori a corrente continua generalmente si ha nell'interferro fra l'armatura e le espansioni polari una intensità di campo da 5000 a 8000 linee per cent. quadrato. Quale sarà la forza agente sull'avvolgimento per ogni metro di filo (100 cm.) posto nel campo attivo e per ogni ampère di corrente?

R. Applicando la formola si ha:

$$P = \frac{100 \times 1 \times 5000}{9810000} = \text{Kg. } 0{,}0509$$

$$P = \frac{100 \times 1 \times 8000}{9810000} = \text{Kg } 0{,}983$$

Dalla formola si deduce un'altra definizione dell'unità di intensità di corrente: l'unità pratica di intensità (ampère) e quella che percorrendo un filo lungo un centimetro ed essendo posto in un campo uguale all'unità (una linea per cmq.) è sollecitato da una forza di 1 decimo di dina.

CAPITOLO IV.

Induzione elettromagnetica

67. Fenomeno generale e casi diversi. — Il fenomeno è il seguente: *quando un filo taglia le linee di forza di un campo magnetico oppure quando in una spirale si provoca una variazione di flusso magnetico, fra le estremità del filo o della spirale si forma una f. e. m. e se il circuito è chiuso si forma la corrente.*

L'apparizione della f. e. m. d'induzione dura il tempo in cui varia il flusso magnetico tagliato dal filo o rinserrato nella spirale. Si dice *campo induttore* il campo magnetico generatore del fenomeno; *circuito indotto* quello in cui si forma la f. e. m. indotta o la corrente indotta.

Esaminiamo alcuni casi d'induzione:

1. Tutte le volte che due fili sono paralleli e vicini l'uno all'altro ed in uno di essi si provoca una variazione di corrente (in incremento o in decremento), nell'altro si forma una f. e. m. indotta. (Fig. 107).

Il fatto è spiegabile immaginando che le linee di forza circolari intorno al filo induttore nello spiegarsi, allorchè si toglie la corrente, tagliano il filo conduttore che è parallelo e vicino.

Una conseguenza di questo fenomeno lo si ha nella *induzione* dei fili telefonici che corrono paralleli con altri fili telefonici o di trasmissione d'energia con corrente alternata. L'induzione si rivela con rumori nel telefono che disturbano le comunicazioni.

2. Se internamente ad un solenoide o spirale si introduce o si estrae una calamita o un elettromagnete diritto si forma una corrente indotta (Fig. 108).

Lo stesso fenomeno si produce se davanti ad un elettromagnete con nucleo moviamo un magnete o un altro elettromagnete; il nucleo magnetizzandosi o smagnetizzandosi sotto l'influenza del magnete induttore suscita una corrente indotta.

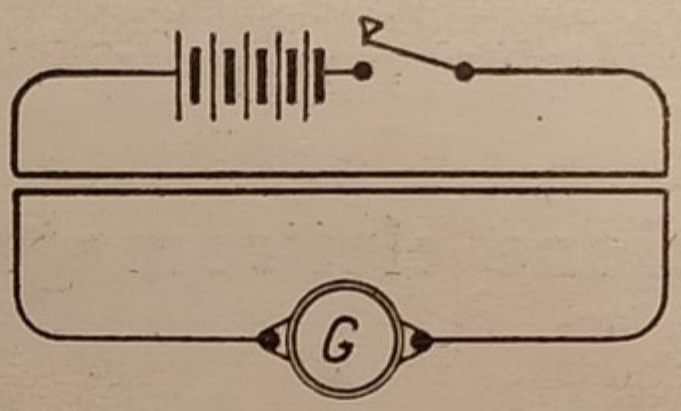


Fig. 107 - Induzione fra due fili paralleli. - G galvanometro.

3. Se sopra un nucleo di ferro sono avvolte due spirali ed in una di esse si fa variare la corrente, nel nucleo si creerà un campo magnetico induttore variabile e quindi nella seconda spirale si formerà una corrente indotta. (Vedi fig. 109).

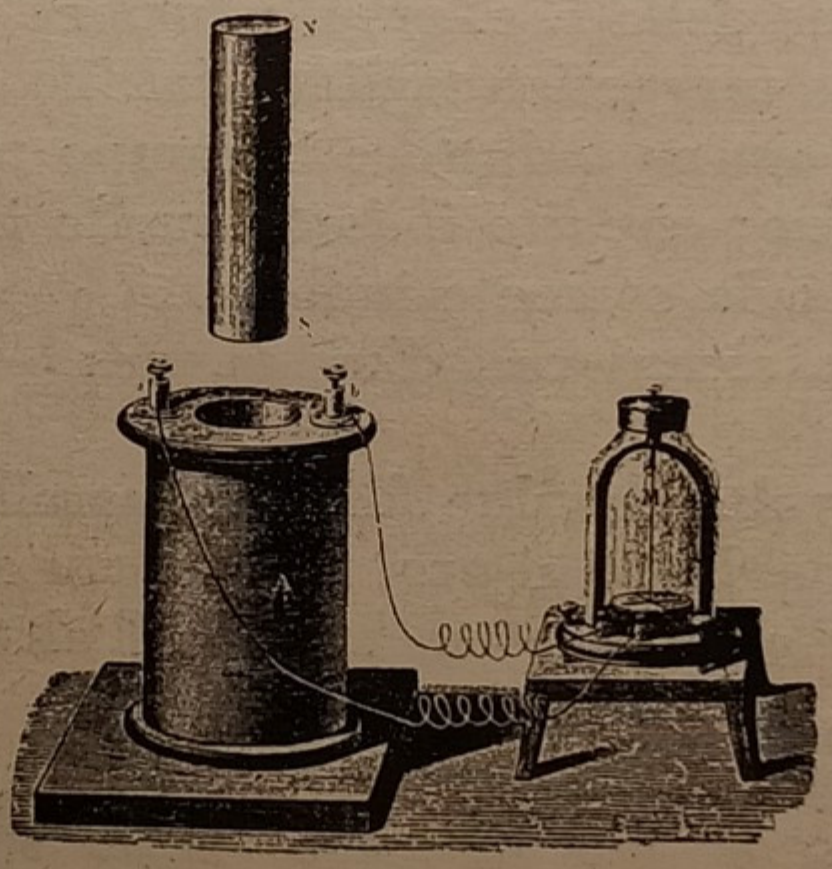


Fig. 108 - Induzione in un rocchetto di filo con una calamita.

Il fenomeno sarà tanto più rilevante se il nucleo di ferro in cui si crea il campo magnetico sarà ad anello ovverossia formerà un circuito magnetico chiuso, poichè un tale circuito presenta una riluttanza minima e permette la formazione di un campo magnetico forte.

Sopra questo principio è basata la costruzione dei *trasformatori* che servono per trasformare la corrente alternata da bassa in alta tensione o viceversa. I trasformatori (Fig. 110) sono formati appunto da nuclei di ferro a circuito magnetico chiuso sui quali sono messi due avvolgimenti spirali e che si chiamano l'uno *primario* A (induttore e l'altro *secondario* B (indotto).

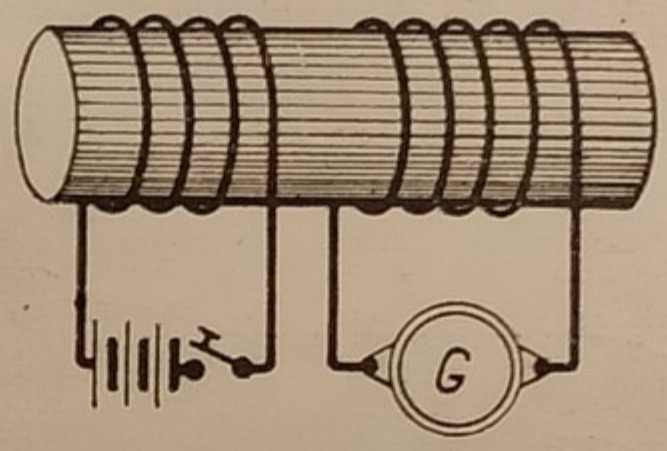


Fig. 109 - Induzione fra due spirali avvolte ad un nucleo di ferro.

4. Se si fa muovere un filo attraverso un campo magnetico in modo da tagliare il flusso si ottiene una f. e. m. ed una corrente indotta (Fig. 111).

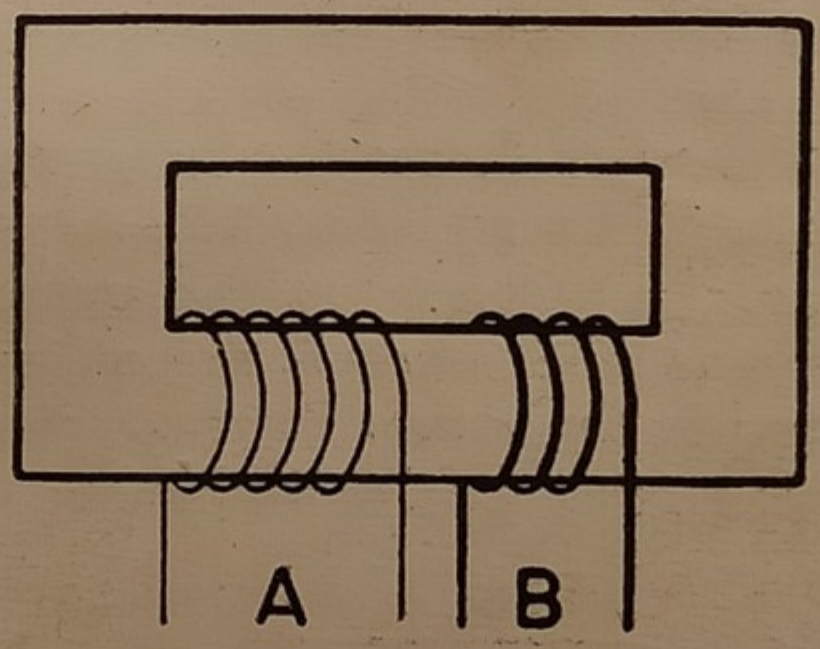


Fig. 110 - Schema di un trasformatore.

5. Se si fa ruotare una spirale di filo in un campo magnetico in modo da tagliare le linee di forza perpendicolarmente, nella spirale si formerà una f. e. m. variabile in ragione della variazione di flusso che si compie internamente alla spirale.

Sopra quest'ultimo fenomeno di induzione elettromagnetica è fondata la costruzione delle dinamo e degli alternatori.

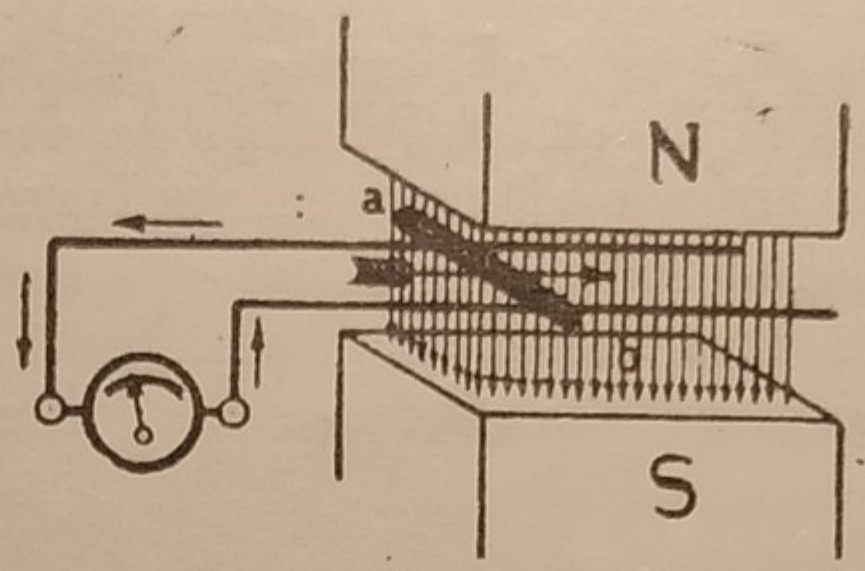


Fig. 111 - Induzione in un filo tagliante un flusso magnetico.

Esse sono rappresentate nella forma più elementare e più semplice dalle fig. 112-113.

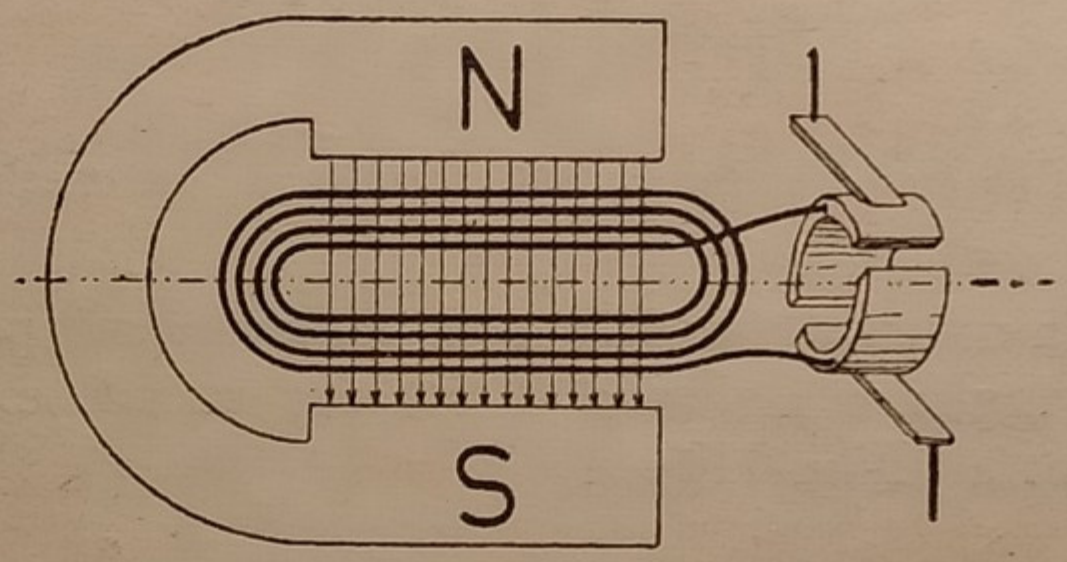


Fig. 112 - Dinamo elementare a indotto girevole.

Una dinamo differisce da un alternatore specialmente nell'organo di raccolta della corrente indotta nella spirale per il circuito esterno. La dinamo si distingue dell'alternatore dal *collettore*, organo che serve a raccogliere e raddrizzare le correnti indotte per farne una corrente continua.

Riassumendo: i fenomeni di induzione elettromagnetica

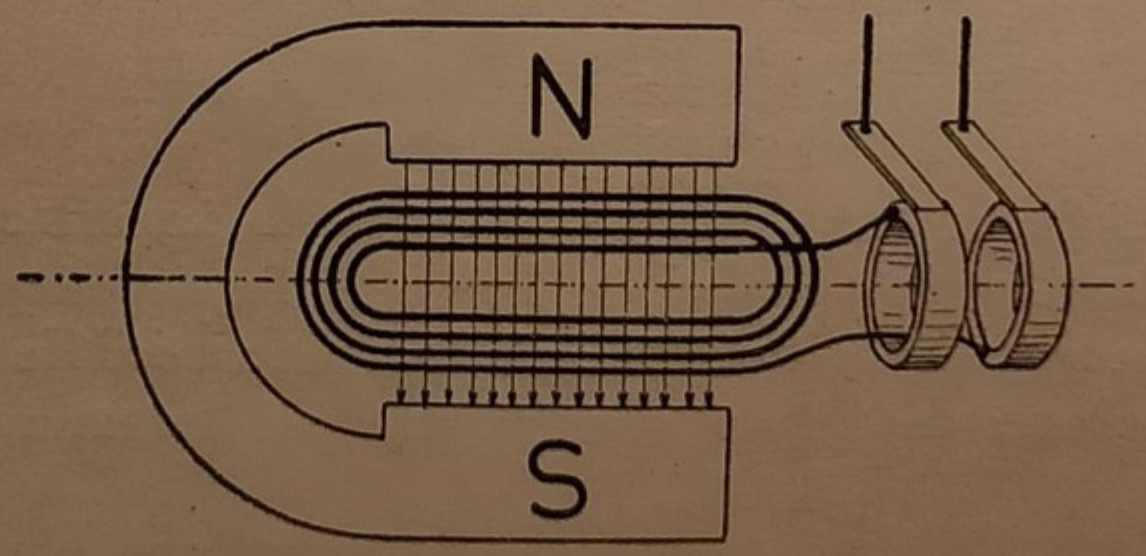


Fig. 113 - Alternatore elementare a indotto girevole.

formano la base per la costruzione delle dinamo, dei trasformatori, alternatori, ecc., e perciò in tutte queste macchine si ha un campo induttore ed un circuito indotto. Il circuito indotto forma a sua volta un *campo magnetico indotto.*

Nei paragrafi che seguono esamineremo altri tre casi speciali di induzione: correnti Foucault, autoinduzione, skin-effect.

68. Leggi dell'induzione elettromagnetica. — *I.* (*Legge della f. e. m. indotta in relazione al tempo*). *La f. e.m. indotta in un circuito è inversamente proporzionale al tempo di variazione delle linee di forza abbracciate o tagliate dal circuito indotto ossia anche: è proporzionale alla velocità di variazione delle linee stesse.*

Cioè ogni qualvolta in una spira di filo (2° - 3° - 5° caso) il flusso varia in un tempuscolo dt di una quantità $d\Phi$ in essa si svolge una f. e. m.:

$$e = - \frac{d\,\Phi}{d\,t}$$

Ossia se il flusso nell'interno si fa crescere da Φ_1 a Φ_2 nel tempo di t minuti secondi, la f. e. m. indotta media nella spira è rappresentata in *unità assolute* (vedi Cap. VI) da:

$$e = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t}$$

Si mette il segno — per indicare che la f. e. m. indotta ha azione contraria al campo induttore ovverossia tende a creare colla sua corrente indotta un campo magnetico opposto, od un moto opposto, a quello secondo cui si è mosso per creare la f. e. m.

Considerando che nelle ordinarie applicazioni pratiche il valore della f. e. m. calcolato colla succitata formola riusciva un numero di molte cifre e quindi molto incomodo per l'uso, si convenne di adottare come *unità pratica* il *volt* cioè un multiplo pari a 100 milioni della *unità assoluta* ossia 10^8 volte tanto.

Quindi l'espressione in volt della f. e. m. media indotta in una spira è data da:

$$e = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{10^8 \times t} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t} 10^{-8} \qquad (1)$$

Se le spire di un solenoide in serie sono N la f. e. m. totale si ottiene moltiplicando e per il numero N.

Nel caso della fig. 111 il numero delle linee Φ di forza tagliate al 1" è dato dal prodotto della lunghezza l in cm., per la velocità di traslazione v in cm. al 1" perpendicolare alle linee di forza e per l'intensità B del campo. Si è convenuto che lo stesso numero che risulta dal detto prodotto servisse anche ad esprimere la f. e. m. indotta in unità assolute ossia 10^8 unità pratiche. Si ha quindi:

$$\text{in unità assolute } e = - l \text{ B } v \qquad (2)$$
$$\text{in unità pratiche Volt} = e = - l \text{ B } v \, 10^{-8}$$

Se il taglio del flusso magnetico invece che perpendicolare avviene per sbieco secondo un angolo α colla direzione del flusso, la f. e. m. indotta sarà

$$e = - l \cdot \text{B} \cdot v \cdot \cos \alpha \cdot 10^{-8} \qquad (3)$$

La corrente sarà in ogni istante per legge di Ohm uguale a e:R essendo R la resistenza del circuito chiuso sulla f. e. m. indotta e.

Dalla formola (2) risulta la definizione seguente:

L'unità di misura assoluta della f. e m. è quella che si sviluppa in un conduttore lungo 1 *centimetro e che taglia colla velocità di* 1 *centimetro al* 1" *delle linee di forza perpendicolarmente in un campo di intensità uno.*

ESEMPIO I.° — Nel cavo di un solenoide formato da 100 spire si fa variare la densità del flusso magnetico da 0 a 10000 linee per cmq. in 1/100 di secondo. Il cavo del solenoide è di 5 cent. Quanti volt si sviluppano di forza elettromotrice?

R. La sezione del solenoide è di 19,5 cmq. quindi il flusso totale sarà 195000. La f. e. m. media durante il movimento sarà secondo la formola (1).

$$e = - \frac{195000}{0{,}01} \times 100 \times 10^{-8} = - 19{,}5 \text{ volt}$$

ESEMPIO 2.° Un treno diretto con una velocità di 90 chilometri all'ora va da ovest a est e quindi gli assi delle ruote tagliano le componenti delle linee del campo magnetico terrestre verticali H = 0,425; trovare la f. e. m. indotta nell'asse di una ruota del vagone in moto lungo mt. 1,51.

La velocità in cm. al 1" degli assi del treno è:

$$\frac{90 \times 10^5}{3600} = 2500 \text{ cm. al } 1''$$

Per cui la f. e. m. secondo la formola (2) sarà data da:

$$e = 10^{-8} \times 0.425 \times 151 \times 2500 = 0.00160438 \text{ volt}$$

ESEMPIO 3.° In una dinamo l'intensità B del campo nell'interferro ed in cui si esercita l'azione della induzione è di 5000 linee per cmq. La velocità dei fili d'armatura taglianti le linee è di 1500 cm. al 1". Quale sarà la f. e. m. indotta nei fili per ogni metro di lunghezza e per il tempo che percorrono l'interferro.

R. Applicando la formola (2) si ha:

$$e = \frac{100 \times 5000 \times 1500}{100\ 000\ 000} = 7{,}5 \text{ volt.}$$

ESEMPIO 4.° Una matassa di 20 cm. di diametro con 200 spire ruota in un campo magnetico uniforme intorno a un asse perpendicolare alle linee di forza con una velocità di 50 giri al 1". Il campo ha una densità H = 500. Qual'è la f. e. m. media indotta?

R. Il flusso massimo abbracciato dalla spirale girando è dato da:

$$\frac{\pi}{4} 20^2 \times 500 = 157000$$

Esso varia periodicamente ogni mezzo giro da $\Phi_1 = 157000$ a $\Phi_2 = -157000$ (ossia di 2×157000) in un tempo pari a:

$$\frac{1}{2} \times \frac{1}{50} \quad \text{ossia} \quad \frac{1}{100} \text{ di } 1''.$$

Perciò la f. e. m. media in ogni mezzo giro sarà per la formola generale:

$$E = \frac{2 \times 157000 \times 200}{\frac{1}{100}} 10^{-8} = 62{,}8 \text{ Volt}$$

II (*Legge della direzione della corrente indotta ossia legge di Lenz*). *La direzione della f. e. m. o corrente indotta dipende da quella dei due elementi: direzione del flusso magnetico induttore e dall'incremento o decremento del flusso delle linee di forza.* Quindi se si inverte la direzione del flusso si inverte anche la corrente indotta. Così pure se il flusso abbracciato è in incremento o in decremento si hanno direzioni opposte di corrente.

La legge di Lenz stabilisce che la direzione della corrente indotta è tale da opporsi (col suo campo indotto) al movimento che la produce.

Una regola facile per trovare le direzioni dei tre elementi campo magnetico, corrente, movimento, in un fenomeno induttivo è dato dalla regola di Fleeming. Si formi colle tre dita pollice, indice e medio della mano destra una specie di angolo triedro (fig. 114) e si disponga il pollice nella direzione del movimento, l'indice nella direzione delle linee di forza; allora il medio darà la direzione della corrente indotta.

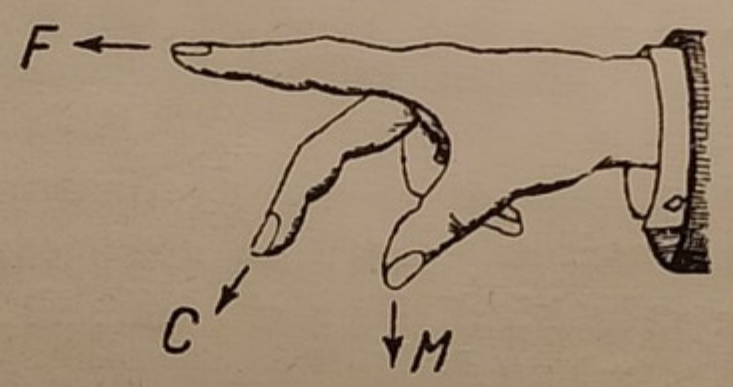


Fig. 114 - Regola di Fleeming.

Un'altra regola è la seguente: Se immaginiamo di disporre un orologio in un flusso magnetico colle linee di forza dirette perpendicolarmente al quadrante, la direzione della corrente è diretta nel senso di rotazione delle sfere se il flusso è in decremento e in senso contrario se in incremento (figura 115).

69. Correnti di Foucault. — Fin'ora abbiamo considerato delle correnti indotte in fili i quali formano una guida naturale alla corrente. Ma se invece sottoponiamo dei pezzi metallici massicci, per esempio lamine, dischi, ecc., ad una variazione di campo magnetico, le correnti indotte si formano ancora, ma non essendo guidate come nei fili, esse assumono forma di vortici di corrente entro dei piani perpendi-

colari al flusso induttore variabile. Così ad esempio se si fa ruotare un disco davanti ad un polo magnetico o nell'inter-

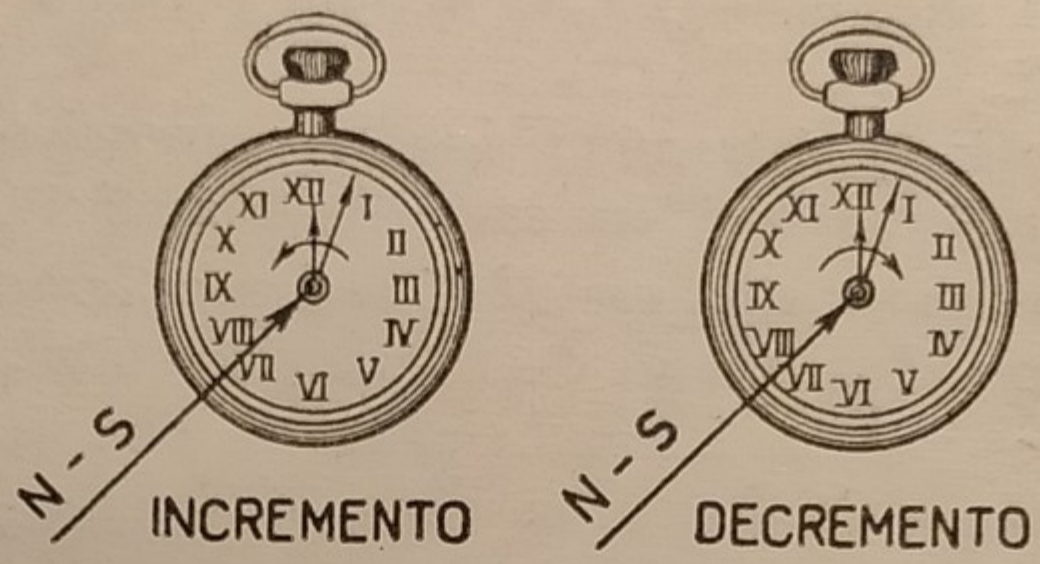


Fig. 115 - Regola degli orologi

vallo fra due poli magnetici opposti le correnti assumono la forma della fig. 116.

Tali correnti vorticose si dicono *correnti di Foucault.*

Le correnti di *Foucault* circolando provocano un riscaldamento; la direzione di queste correnti vorticose sarà deter-

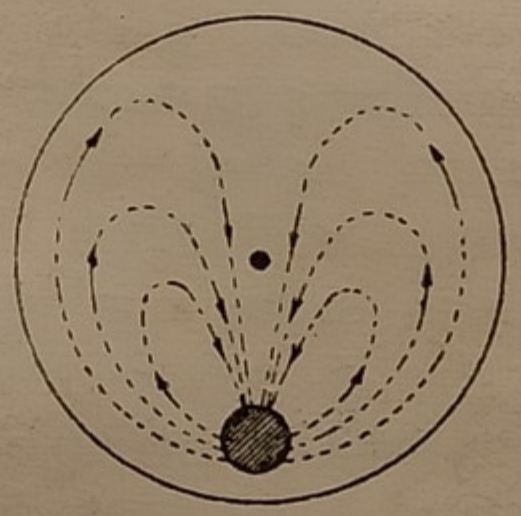


Fig. 116 - Correnti di Foucault in un disco girevole sotto una calamita.

minata dalla legge di Lenz e cioè saranno tali da creare campi magnetici indotti contrari all'azione che tende a produrre le correnti stesse. Così nel caso della fig. 116 si formeranno due vortici di corrente che creano due poli magnetici indotti di nome contrario e che tendono a contrastare il movimento del disco sotto al polo. Se invece il disco sta fermo e si fa variare il campo magnetico attraverso al disco i vortici di corrente saranno concentrici alla direzione del campo induttore.

Siccome negli indotti delle dinamo, motori, alternatori e nei nuclei dei trasformatori per corrente alternata vi sono delle masse di ferro soggette a campi magnetici periodica-

mente variabili così se quelle masse fossero piene, esse sarebbero sede di forti correnti di Foucault che li riscalderebbero fortemente. Si avrebbe cioè un danno ed una perdita notevole di energia.

A ovviare in queste macchine le correnti di Foucault, i nuclei di ferro ruotanti in campi magnetici o comunque soggetti a flussi magnetici variabili si fanno lamellari cioè con lamine di ferro dolce o di ferro silicioso dello spessore di 0,35-0,5 mm. e disposte secondo piani in direzione del flusso ed isolate l'una dall'altra con carta o vernice in modo da impedire la formazione di correnti indotte le quali, come abbiam detto, sono perpendicolari alla direzione del flusso.

70. Autoinduzione. — Ad un circuito qualsiasi percorso da corrente è sempre concatenato un flusso magnetico il quale rappresenta (come abbiamo visto al parag. 64) una certa riserva di energia accumulata allo stato potenziale nello spazio. Qualunque variazione nella corrente del circuito in aumento od in decremento porta un equivalente variazione della energia magnetica accumulata nello spazio. Faraday ha osservato per il primo che questa energia è fornita od è ricevuta dal circuito stesso e cioè tra il circuito ed il campo magnetico ad esso concatenato avvengono degli scambi di energia tutte le volte che si producono variazioni nella corrente. Gli scambi avvengono in questo modo: Durante il tempo che dura l'incremento di corrente si osserva una depressione di tensione nel circuito di segno contrario alle f. e. m. attiva che produce la corrente. Al contrario, durante il tempo che dura un decremento di corrente e di flusso si osserva nel circuito un aumento di tensione che tende sovrapporsi alla f. e. m. attiva. (Vedi fig. 117).

Questo fenomeno di reazione si dice di autoinduzione o selfinduzione perchè segue le stesse leggi dell'induzione.

Riassumendo: *si dice autoinduzione l'induzione elettromagnetica che il flusso proprio concatenato ad un circuito crea come induttore sul circuito medesimo che fa da indotto.* Il fenomeno è sottoposto alle leggi della induzione e precisamente alla legge della f. e. m. indotta e alla legge di Lenz.

Il fenomeno dell'auto-induzione trova un perfetto riscontro nella forza di inerzia che oppongono i corpi pesanti

quando si trovano in movimento; è noto che a qualunque accelerazione corrisponde una forza d'inerzia contraria a quella attiva che provoca l'accelerazione e un immagazzinamento di energia che diremo *inerziale* nel corpo. A qualunque decremento di velocità o *deaccelerazione* corrisponde una forza che tende a mantenere la velocità e ad opporsi al decre-

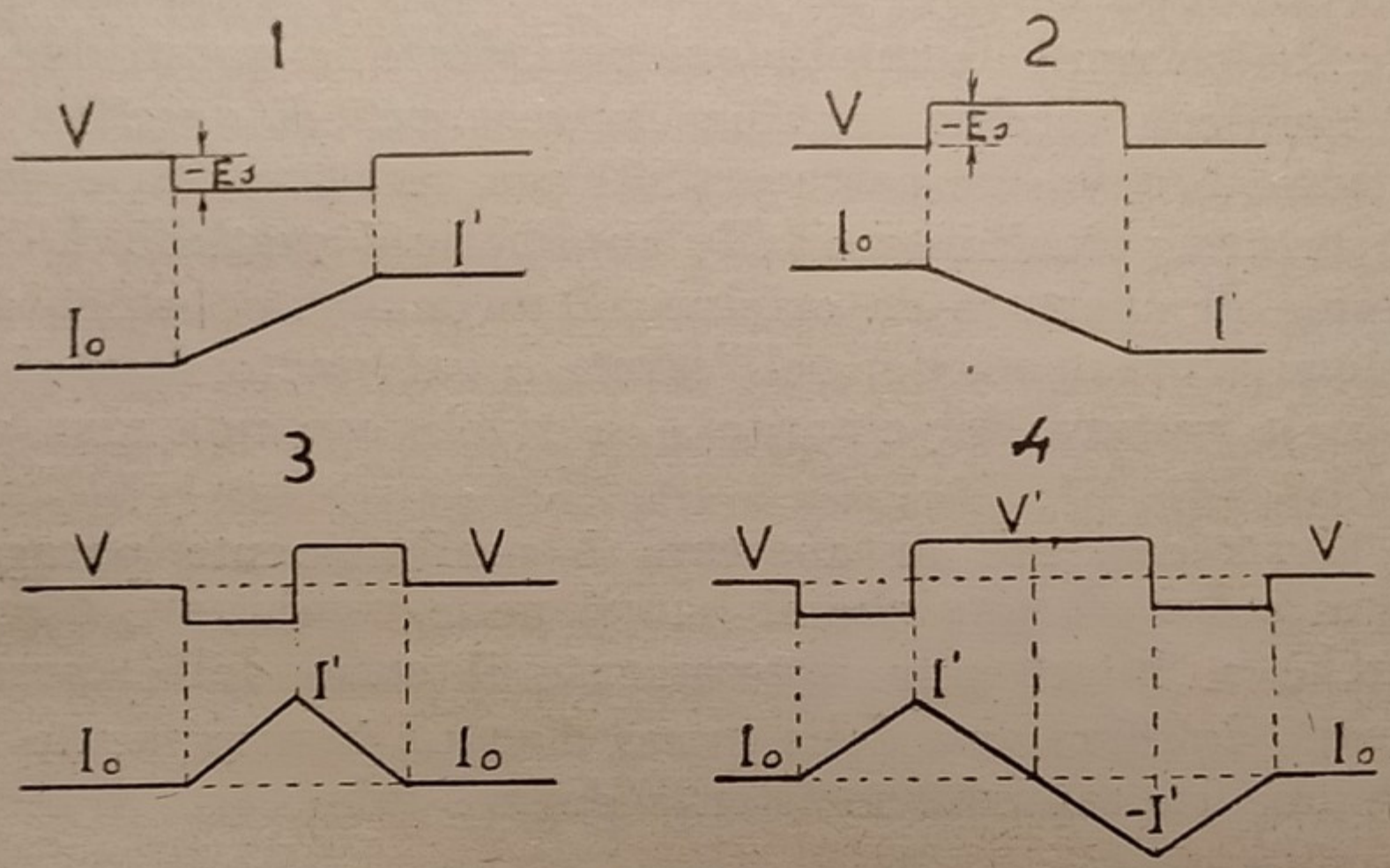


Fig. 117

Quattro casi di autoinduzione: 1) incremento di corrente; 2) decremento di corrente; 3) incremento e decremento; 4) stesso caso precedente ma con inversione di direzione della corrente. I_0 = corrente iniziale; V tensione iniziale; Es f. e. m. di autoinduzione; 1^1 corrente finale.

mento. I volani delle macchine sono appunto fondati su questi fenomeni; essi si oppongono sia alle accelerazioni di movimento che alle deaccelerazioni ora immagazzinando e ora fornendo forza alternativamente in modo da mantenere costante la velocità.

In elettricità alla velocità dei gradi corrisponde l'intersità della corrente e alla forza di inerzia una f. e. m. di induzione che si aggiunge o si toglie alla tensione applicata alla estremità del circuito che si considera. Tra il circuito ed il campo magnetico ad esso concatenato avviene uno scambio di energia inerziale.

La f. e. m. di autoinduzione essendo contraria alla tensione applicata od attiva si può assimilare ad una *resistenza*.

La f. e. m. di autoinduzione sarà evidentemente molto

più forte quando la spirale avvolge nuclei di ferro, poichè il ferro ha grande potere moltiplicatore dei flussi magnetici.

Una linea aerea formata da un filo di andata e uno di ritorno di corrente è sede di una f. e. m. di autoinduzione perchè si crea un flusso magnetico fra essi.

La massima velocità di variazione di corrente per un determinato circuito si ha quando si apre o si chiude il circuito. Le correnti di autoinduzione indotte in questi due casi si dicono con vecchio termine *extracorrenti di apertura* o *di chiusura*. Fra le due extracorrenti più caratteristica è quella di *apertura* poichè interessa le applicazioni pratiche. L'extracorrente di apertura dà origine ad un aumento brusco della tensione (sovratensione) nell'istante e nel punto dove si eseguisce la rottura del circuito e si rivela con una viva scintilla.

L'extracorrente di apertura è perfettamente paragonabile ai *colpi d'ariete* che si hanno nelle condutture d'acqua allorchè si interrompe bruscamente il corso della corrente d'acqua; la forza viva della massa d'acqua in movimento produce una soprapressione istantanea nel tubo.

ESPERIMENTI. — 1.° In derivazione sopra il circuito di una forte selfinduzione Z rappresentata ad esempio dal primario di un trasformatore si metta una lampadina e si regoli colle resistenze R (Fig. 118) la intensità di una corrente continua in modo che la lampadina sia debolmente accesa.

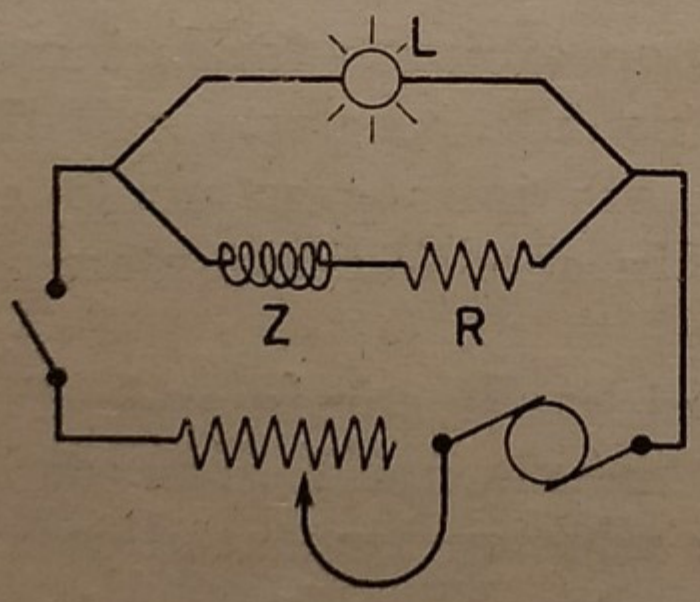


Fig. 118 - 1.° Esperimento per dimostrare l'auto induzione.

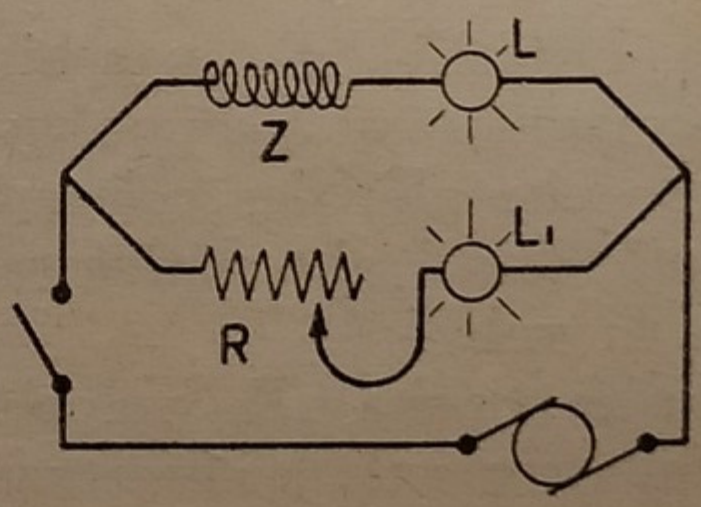


Fig. 119 - 2.° Esperimento

Si osserva che chiudendo il circuito coll'interruttore la lampada brilla per un istante, perchè nel chiudere il circuito la corrente non può passare nella autoinduzione. Quando si interrompe la corrente si vede brillare di nuovo la lampada in ritardo rispetto all'istante dell'interru-

zione e ciò è dovuto all'energia magnetica immagazzinata in Z che si scarica sulla lampadina (extracorrente di rottura).

2.° Si formino due derivazioni parallele contenenti l'una una lampadina e una selfinduzione Z (secondario di un trasformatore) e l'altra una lampadina ed una resistenza R (Fig. 119) in modo che le correnti derivate siano uguali e che le lampade abbiano a brillare ugualmente. Si osserva allora che all'istante della chiusura dell'interruttore la lampada L' si accende subito e quella L si accende in ritardo perchè nel suo circuito si crea una f. e. m. di autoinduzione.

I circuiti che sono concatenati con forti campi magnetici, si dicono *circuiti induttivi* o *resistenze induttive* o *induttanze*; i fenomeni di autoinduzione sono tanto più appariscenti quanto più numerose sono le spire, quanto maggiore è la rapidità di variazione della corrente e quanto maggiore è il flusso variato. Essi acquistano una grande importanza quando si tratta di correnti alternate e cioè di correnti periodicamente variabili.

Le *resistenze induttive* hanno effetto diverso *dalle resistenze ohmiche*. Nelle prime oltre la resistenza in ohm propria del circuito vi si formano delle f. e. m. di induzione, quando la corrente è variabile od alternata, che contrastano il passaggio della corrente stessa. Nelle seconde invece il contrasto è dato soltanto dalla resistenza in ohm; quest'ultima offre un vero attrito al passaggio della corrente e dà luogo ad una vera perdita di energia e ad un riscaldamento. Le resistenze induttive possono invece opporsi al passaggio della corrente alternata formando una forza contro elettromotrice ma senza creare una perdita di energia maggiore di quella rappresentata dagli Ohm di resistenza.

71. Coefficiente di autoinduzione o induttività. — Il flusso magnetico Φ di linee di forza prodotto da una corrente in un circuito induttivo privo di ferro è proporzionale alla intensità I di corrente; onde avremo:

$$\Phi = LI \qquad (\text{in unità pratiche } LI = \Phi\, 10^{-9}) \qquad (1)$$

in cui L è un coefficiente di proporzionalità che si dice di *self-induzione* o di *auto-induzione*. Esso dipende solo dagli elementi geometrici (spire, lunghezza, ecc.). Per il fenomeno della induzione elettromagnetica sappiamo che facendo un

piccolo incremento da Φ_1 a Φ_2 ossia da I_1 a I_2 nel tempo t si crea una f. e. m. indotta e di:

$$e_s = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t}$$

Essendo $\Phi_1 = LI_1$ e $\Phi_2 = LI_2$ si ha:

$$e_s = \frac{L\ (I_1 - I_2)}{t} \qquad (2)$$

Per l'applicazione di queste formole e L, Φ, I devono essere espresse in unità assolute o C. G. S. *Ma per gli usi della pratica si è convenuto di impiegare la stessa formola* (2) *adoperando le unità pratiche volt, ampère e secondi.*

Allora se si mette $I_2 - I_1$ = un ampère; $t = I_1 - I_2$ un secondo si ha che $e = L$ *volt. Cioè il coefficiente L esprime la f. e. m. di autoinduzione quando nel circuito considerato si produce un incremento di* 1 *amp. al* 1".

La unità di misura di L si dice Henry e corrisponde a 10^{-9} unità assolute. Per un dato circuito induttivo L è costante se non vi è presenza di ferro o se il ferro è poco saturato; in caso contrario L è variabile a seconda del valore della intensità B del flusso. Infatti negli elettromagneti, il flusso Φ non è proporzionale a I, ma cresce sempre meno di I quanto più il ferro si avvicina alla saturazione.

Nei manuali si possono trovare delle formole che danno il valore L per diversi casi pratici.

Troviamo il valore di L per un solenoide senza ferro. Sappiamo (parag. 58) che il flusso concatenato è dato:

$$\Phi = SH = S\,\frac{4\ \pi\ N\ I}{10\ \ l}$$

Questo flusso variando di una quantità $d\ \Phi$ nel tempuscolo $d\ t$ produce in ogni spira una f. e. m. di selfinduzione

$$e_s = \frac{d\ \Phi}{d\ t}$$

Ma le spire sono N e sono messe in serie, onde la f. e. m. *e* all'estremità del filo del solenoide sarà:

$$N\ e_s$$

come se il flusso fosse N Φ. Applicando la formola generale (1)

$$L\ I = N\ \Phi = S\ \frac{4\ \pi\ N^2\ I}{10\ \ l}$$

e in unità pratiche:

$$L = \frac{4\ \pi\ N^2}{l}\ S\ .\ 10^{-9}$$

e per un elettromagnete con nucleo di ferro con B minore di 8000-10000 linee cmq. si ha:

$$L = \frac{4\ \pi\ N^2}{Ri}\ 10^{-9} \text{ in cui } Ri = \text{riluttanza} = \frac{l}{\mu\ S}$$

dove: N è il numero delle spire; S la sezione in cmq. *l* la lunghezza del solenoide in cm.; μ la permeabilità.

Siccome μ può assumere valori molto elevati (1500-2000) così si vede che la presenza del ferro *fa aumentare nella stessa proporzione* L e quindi la f. e. m. di autoinduzione.

Il coefficiente L di selfinduzione si chiama anche *induttività.*

72. Energia intrinseca di una corrente. — Vediamo ora qual'è il *lavoro che si spende in un circuito induttivo per creare il campo magnetico.* Tale lavoro sarà corrispondente agli ampère medi nel periodo di variazione da zero al valore I moltiplicati per i volt e per il tempo. Ora gli ampère medi quando la corrente passa da zero al massimo I sono espressi da I : 2. Avremo quindi:

$$\text{Joule} = e_s\ \frac{I}{2}\ t \quad \text{Ma } e_s = \frac{LI}{t}$$

Sostituendo si ha:

$$\text{Joule} = \frac{LI^2}{2}$$

La formola esprime l'energia accumulata nel campo magnetico del circuito ed anche l'energia intrinseca della corrente I e cioè indipendentemente dal lavoro che essa compie nel circuito. Questa energia rappresenta il lavoro restituito al circuito quando si interrompe la corrente I sotto forma di arco voltaico o scintilla di rottura.

Applicazioni numeriche:

1.° Un circuito induttivo ha un coefficiente di selfinduzione di un Henry. Si supponga di provocare l'interruzione di detto circuito con corrente di 50 Amp. in un centesimo di minuto secondo (0,01). Si domanda quale sarà la f. e. m. di extracorrente? Qual'è l'energia liberata sotto forma di scintilla?

R. Applicando la formola (1) si ha:

$$e_s = \frac{LI}{t} = \frac{1 \times 50}{0{,}01} = 5000 \text{ volt}$$

L'energia restituita sotto forma di arco voltaico sarà:

$$\frac{LI^2}{2} = \frac{1 \times 50^2}{2} = 1250 \text{ joule o watt-secondo}$$

2.° Trovare il coefficiente di autoinduzione di un avvolgimento su nucleo di ferro ad anello chiuso lungo 100 cm., della sezione di 200 cmq. e formato da 300 spire. La permeabilità è di 1000. La riluttanza è:

$$R = \frac{l}{\mu s} = \frac{100}{1000 \times 200} = 0{,}0005$$

Quindi il coefficiente di selfinduzione sarà:

$$L = \frac{4\ \pi\ 300^2}{0.0005}\ 10^{-9} = 2.26 \text{ Henry}$$

Se non vi fosse nucleo di ferro ma soltanto le 300 spire essendo $\mu = 1$ per l'aria, la riluttanza sarebbe 1000 volte maggiore e quindi L 1000 volte minore.

73. Mutua induzione. — Consideriamo il caso di induzione elettromagnetica fra due circuiti chiusi 1 e 2 formati

da due fili paralleli o da due solenoidi sovrapposti od affacciati e senza nucleo di ferro. (Fig. 120).

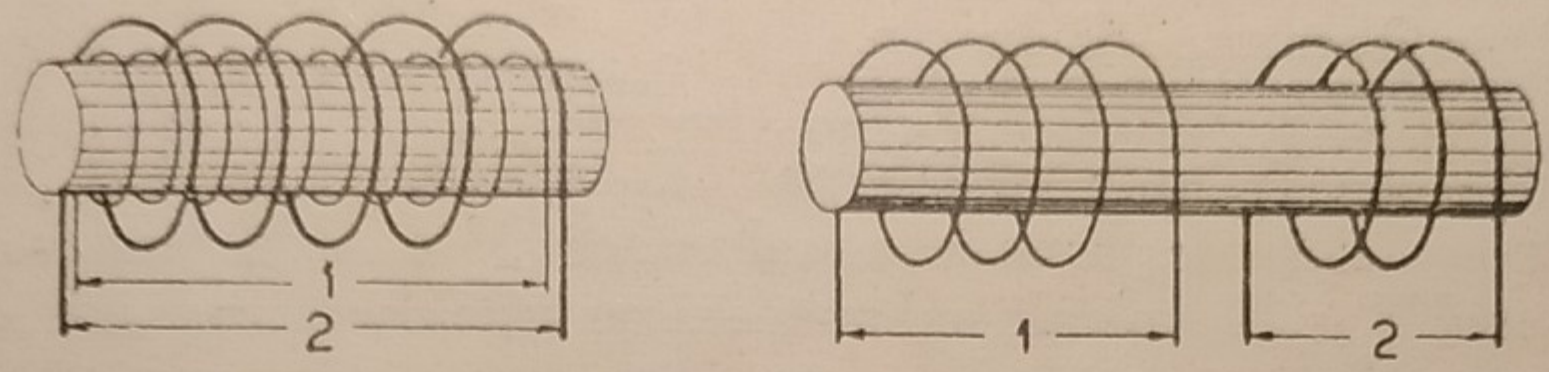


Fig. 120 - Mutua induzione fra due circuiti.

Quando si fa variare la corrente nel circuito 1 (induttore) si formerà una corrente indotta nel circuito 2. Questa corrente produrrà un campo magnetico il quale attraversando le spire dell'induttore vi susciterà una f. e. m. indotta. Per la legge di Lenz questa ultima f. e. m. indotta nel circuito 1 sarà diretta in senso contrario della f. e. m. propria del circuito stesso se la corrente è in incremento, in senso contrario se è in decremento.

Questo fenomeno reciproco si dice di *mutua induzione*.

E' facile intuire che, se le spire sono uguali, la f. e. m. indotta del circuito 1 sul 2 per ogni variazione di un ampère al 1" sarà uguale a quella indotta del circuito 2 sull'1 per la stessa variazione di corrente. La f. e. m. prodotta con questa variazione e con un ampère al 1" si dice *coefficiente di mutua induzione* e si esprime, come quello della selfinduzione, in unità dette *Henry*. Il coefficiente di mutua induzione di due circuiti posti nelle condizioni accennate in principio esprime (in unità assolute) il flusso di induzione che attraversa uno qualunque di essi quando l'altro è percorso dall'unità di corrente. Esso varia a seconda della posizione relativa dei due circuiti, della loro forma, del numero delle spire. La presenza di nuclei di ferro fa alterare enormemente il coefficiente.

Le linee di trasmissione di energia elettrica rappresentano circuiti induttivi per *l'autoinduzione* dovuta al campo magnetico intorno ai fili, quanto per la *mutua induzione* tra i fili vicini costituenti la linea. Il coefficiente L delle linee industriali varia intorno a un *millihenry* per ogni chilometro di filo semplice. Ecco una formola esatta

$$L = \left(4.6 \quad log. \frac{d}{r} + a\right) 10^{-4}$$

L = coefficiente di self in henry per ogni chilometro di filo semplice (per due fili è il doppio)
d = distanza fili in cm.
r = raggio sezione in cm. dei fili
a = coefficiente = 0,5 per filo unico.

Il coefficiente di mutua induzione M di due circuiti avvolti con N_1 e N_2 spirali sul medesimo nucleo e una sull'altra è espresso:

$$M = \frac{4\ \pi\ N_1\ N_2}{10\ Ri}\ 10^{-8}$$

Dove Ri è la riluttanza.

ROCCHETTO DI RHUMKORFF. — L'apparecchio serve a produrre scintille elettriche ed ha una vasta applicazione nei laboratori di fisica per esperienze sulle scariche nei gaz e per scopi medicali.

Il rocchetto è un piccolo trasformatore formato da un nucleo di ferro diritto (fascio di fili di ferro dolce) sul quale è avvolto: un circuito induttore o primario formato da poche spire (50 a 100) di filo grosso; un circuito secondario formato da un filo sottilissimo (uno a due decimi di mm.) e molto lungo. Nei grandi modelli il filo è lungo diversi chilometri. Si richiede un isolamento accuratissimo e una confezione affatto speciale altrimenti le scariche invece di formarsi esternamente,

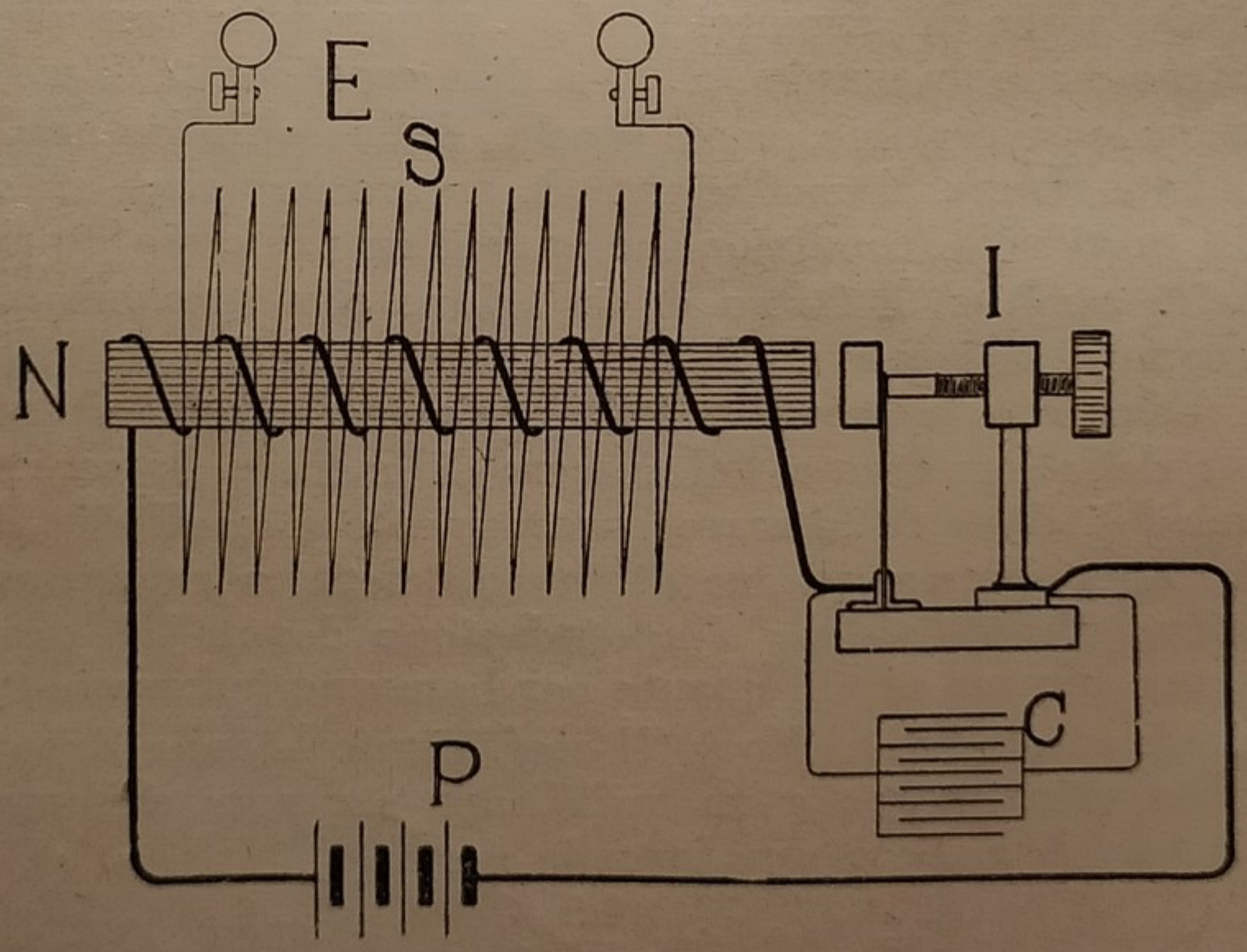


Fig. 121 - Schema di un rocchetto di Rhumkorff.

esse possono formarsi internamente e guastare l'avvolgimento. A differenza dei trasformatori comuni il nucleo magnetico non forma circuito magnetico chiuso. All'estremità del detto nucleo vi è un'ancora di ferro oscillante come quella degli ordinari campanelli e che fa da interruttore (Fig. 121).

Il circuito primario è alimentato da alcuni elementi di pila attraverso l'interruttore oscillante (trembleur) e perciò nel primario si forma una corrente pulsante. Per eliminare le scintille al contatto dell'interruttore oscillante si dispone, in derivazione fra la molla ed il contatto fisso, un condensatore C.

Col rapido movimento oscillatorio dell'ancora il nucleo si magnetizza e si smagnetizza a rapidi intervalli. Perciò nel circuito secondario si formeranno nelle spire delle forze elettromotrici indotte alternativamente di senso contrario.

Praticamente le più forti sono le f. e. m. corrispondenti all'apertura del primario poichè la smagnetizzazione, dato lo strappo quasi istantaneo della corrente, è più rapida che non la magnetizzazione. Essendo in serie le spire dell'avvolgimento le f. e. m. indotte vengono a sommarsi e perciò, dato il grande numero delle spire stesse, alla estremità del secondario avremo una f. e. m. risultante grandissima (nell'ordine di molte migliaia di volt).

Viceversa la intensità delle correnti, data l'enorme resistenza del circuito e quella dell'interspazio d'aria in cui scoccano le scintille, sarà estremamente piccola (nell'ordine di alcuni milionesimi di Ampère). Si costruiscono modelli che danno 40 cm. di scintilla equivalenti a tensioni di 150 mila volt.

Applicazioni numeriche:

1.° Trovare l'induttanza di un circuito avvolto sopra un nucleo di ferro a circuito magnetico chiuso della sezione di 10 × 10 cm. con 2000 spire. Permeabilità media 300, lunghezza 120 cm.

2.° Trovare la f. e. m. di selfinduzione interrompendo nel detto circuito precedente una corrente di 6 A in un centesimo di secondo.

3.° Qual'è l'energia accumulata nel nucleo di ferro nell'esempio 1.° e 2°.

4.° Quale sarebbe l'energia accumulata se il nucleo di ferro avesse un interferro nel circuito magnetico di 1 cm.

CAPITOLO V.

Correnti alternate

74. Corrente alternata. — Una corrente alternata è formata da una successione periodica di correnti alternativamente di senso contrario ossia è una corrente che periodicamente da zero aumenta, in una direzione, fino ad un massimo, poi diminuisce fino a zero; ritorna a crescere ma in direzione contraria fino ad un massimo per decrescere fino a zero e poi ricominciare a crescere ecc. Si dice *periodo* una ondulazione di corrente in un senso e una successiva ondulazione in senso contrario. Ogni ondulazione costituisce una *alternanza*.

Si dice *frequenza* il numero dei periodi al minuto secondo. Siccome un periodo è composto di due alternanze o mezzi periodi, così la frequenza esprime la metà delle alternanze al 1".

Si dice *ampiezza* di una corrente alternata il valore massimo che raggiunge in un'alternanza. Normalmente la ampiezza della ondulazione positiva è uguale a quella della negativa.

Per provocare una corrente alternata occorre che vi sia anche una f. e. m. alternata.

Le frequenze più impiegate sono: 50, 42 per gli usi industriali di forza motrice e illuminazione. Le frequenze 25 e 16 sono impiegate per la trazione elettrica a corrente alternata.

La corrente alternata produce *campi magnetici alterna-*

tivi; nei conduttori produce riscaldamento per effetto Joule; non produce effetti elettrolitici sensibili perchè le onde di corrente alternativamente di senso contrario distruggono gli opposti effetti elettrolitici. Vi sono dei casi in cui questi effetti si risentono e possono essere utilizzati.

I vantaggi che offre nelle applicazioni la corrente alternata in confronto della corrente continua sono diversi: 1.° Le macchine generatrici, od alternatori, sono di costruzione più semplice delle dinamo, non hanno collettore e offrono molto minori difficoltà di isolamento per cui è facile costruire alternatori per tensioni molto più alte di quelle che si possono praticamente raggiungere colle dinamo. 2.° La corrente alternata può essere trasformata da bassa tensione in alta tensione o viceversa mediante i trasformatori che sono apparecchi fissi (statici), in generale ad alto rendimento e che non richiedono spesa di sorveglianza continua.

Ottenendosi correnti alternate ad alta tensione e piccola intensità queste si possono con minor spesa trasmettere a grandi distanze e distribuirle a bassa tensione agli stabilimenti e privati, il che colla corrente continua sarebbe difficile di poter fare.

Una corrente alternata si può produrre facendo girare una spirale di filo in campo magnetico come è indicato al caso 5.° del paragrafo 67, approfittando del fenomeno della induzione elettromagnetica.

75. Rappresentazione grafica delle correnti alternate. — Le correnti alternate si dicono periodiche perchè ad ogni periodo ripetono lo stesso andamento. Per la loro rappresentazione basterà quindi limitarsi ad un solo periodo. Tale rappresentazione si può fare matematicamente mediante delle *funzioni periodiche* oppure graficamente mediante *diagrammi* ottenuti normalmente in questo modo:

Sopra una linea retta orizzontale o asse delle ascisse, si segnano tanti tratti che rappresentano i tempuscoli successivi nei quali si può suddividere un periodo e per ciascuno di essi si segna sulla ordinata il valore istantaneo, che si suppone conosciuto, della intensità della corrente. Unendo i punti ottenuti con una linea si ottiene *la curva* della corrente alternata. Il sistema si dice a *coordinate cartesiane*.

La fig. 122 rappresenta alcune curve caratteristiche di correnti alternate industriali.

Come si vede da queste figure le correnti alternate industriali presentano andamenti differenti e irregolari: talvolta esse sono schiacciate sono appuntite, talvolta seghet-

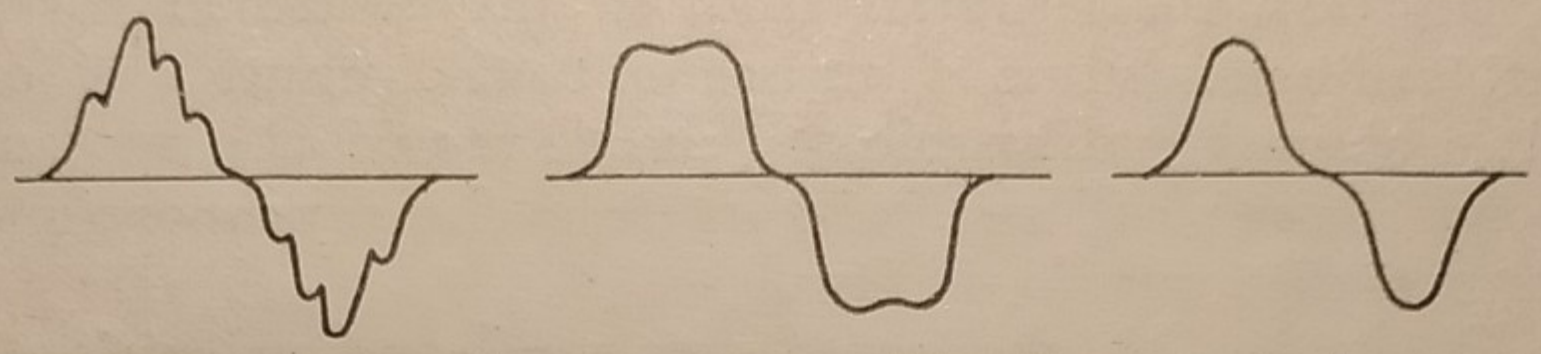


Fig. 122. - Forme diverse caratteristiche di correnti alternate.

tate. La forma delle curve dipende dalla costruzione degli alternatori o da f. e. m. che per molte cause si intromettono nei circuiti e tendono a deformare le curve originali date dai generatori.

La forma più regolare di corrente alternata e che si ottiene coi migliori alternatori è data dalla *sinusoide* che è una curva geometricamente e matematicamente ben definita. Essa si disegna in questo modo: (fig. 123).

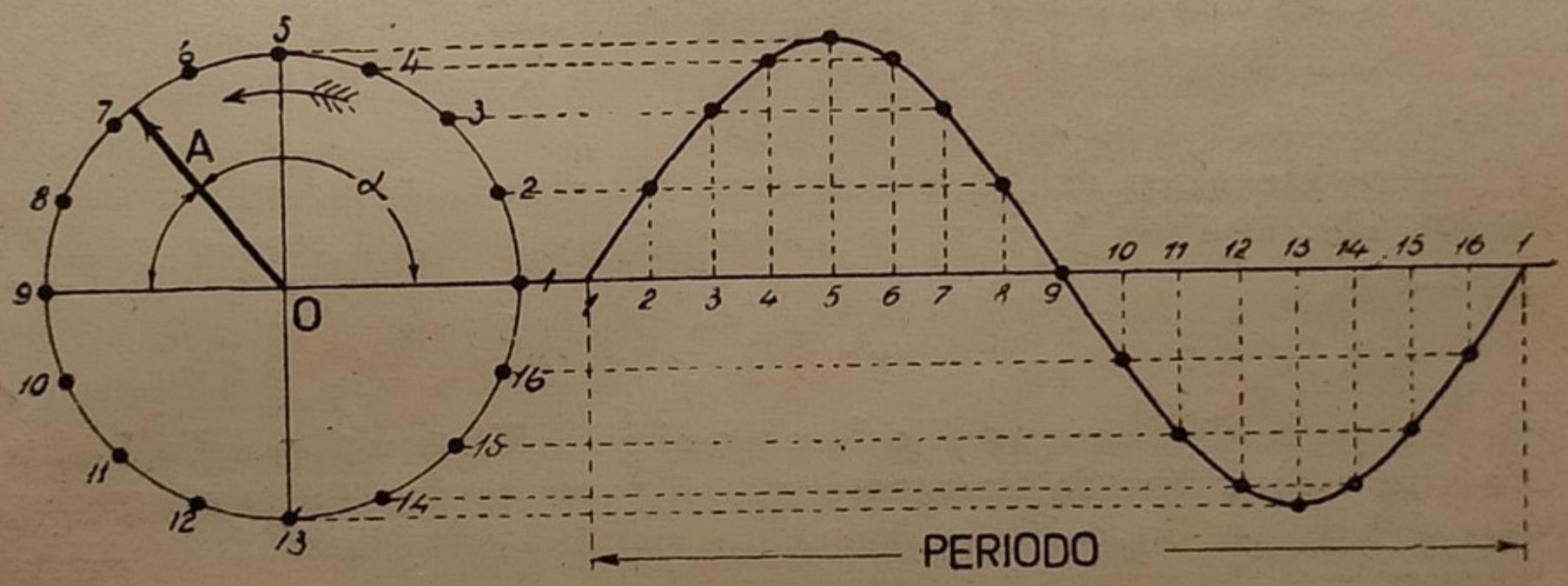


Fig. 123. - Tracciamento di una sinusoide.

Si consideri un raggio OA di una circonferenza, il quale abbia una lunghezza, in una determinata scala, proporzionale alla intensità o alla f. e. m. massima in un semiperiodo e che si dice *ampiezza*. Si supponga che questo raggio ruoti con *velocità uniforme* in ragione di un giro ogni periodo ossia con un numero di giri uguale alla frequenza. Sopra il prolungamento di un diametro orizzontale della circonferenza

1-9 si segnino tanti punti rappresentanti i tempi successivi che il punto A occupa girando. Per ciascun punto si innalzi una perpendicolare e si segni in altezza la proiezione del raggio OA nell'istante considerato. Cioè dai punti 1-2-3-4 ecc. che il punto A occupa successivamente sulla circonferenza si tirino tante orizzontali fino ad incontrare le corrispondenti ordinate. Infine si uniscano tutti i punti e si otterrà così la sinusoide. L'angolo α che il raggio OA ruotando fa in ogni istante coll'asse orizzontale e che è proporzionale al tempo si dice *angolo di fase.*

Il raggio OA che ruota con uniforme velocità si dice *vettore ruotante.*

Si osserva che il valore istantaneo della f. e. m. o dell'intensità di una corrente alternata è dato dal vettore OA moltiplicato per il seno dell'angolo α. L'espressione matematica di una corrente alternata si basa sul principio che in una funzione periodica il tempo si misura in angoli o in parti di 2π essendo un periodo equivalente a 2π ossia 360°. Il valore istantaneo al tempo t dell'angolo α a partire da un istante zero sarà $2\pi \frac{t}{T}$ dove T è la durata di un periodo in minuti secondi. Ma se f è la frequenza si ha:

$$T = \frac{1}{f} \text{ ossia } f = \frac{1}{T}$$

Il valore istantaneo dell'angolo di fase sarà cioè $2\pi ft$; quello dell'ordinata che esprime f. e. m. o l'intensità al tempo t sarà data dalla funzione:

$$a = A \text{ sen } (2\pi f t)$$

dove al posto di A si mette il valore massimo dell'intensità o della f. e. m. Se invece di partire da un istante zero si parte da una posizione qualunque del vettore in cui esso forma un angolo φ coll'asse delle ascisse l'espressione del valore istantaneo sarà:

$$a = A \text{ sen } (2\pi f t + \varphi)$$

Il valore $2\pi f$ che si riscontra spesso nelle formole si dice *pulsazione*; di solito lo si indica colla lettera greca ω.

Quando una corrente non ha la forma sinusoidale, si dimostra che le curve deformate a cui abbiamo accennato, si possono scomporre in una *sinusoide fondamentale* e in altre di frequenza 3, 5, 7 volte la frequenza fondamentale che si

sovrappongono alla prima. Queste correnti che spesso si incontrano nei circuiti e che deformano la sinusoide si dicono *armoniche*. (Fig. 124).

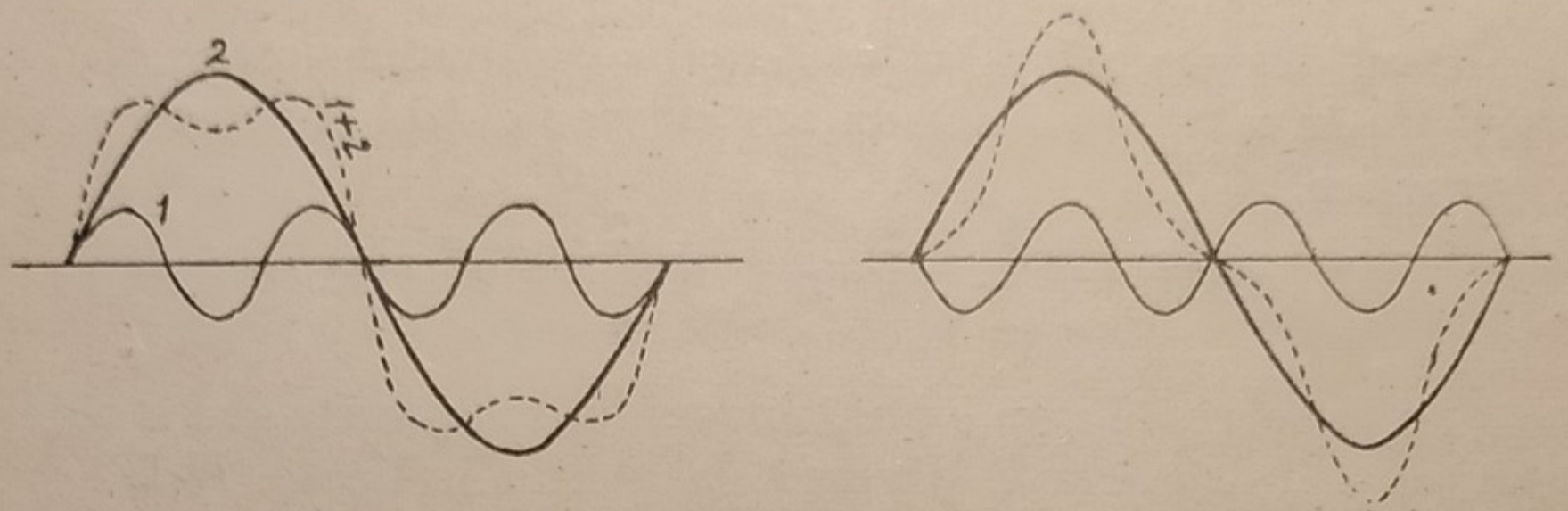


Fig. 124 - Deformazione di una sinusoide fondamentale per mezzo di una armonica di 3° grado.

76. Intensità e forza elettromotrice efficace od effettiva. — Si dice intensità o f. e. m. efficace di una corrente alternata il valore che dà lo stesso effetto termico od elettrodinamico di una corrente continua. In altri termini se una corrente alternata produce con la stessa resistenza l'identico effetto termico di una corrente continua di intensità I, si dice che I è l'intensità efficace della corrente alternata. Il valore efficace di una corrente o di una f. e. m. è quello dato da quegli strumenti di misura pei quali il senso di direzione della corrente è indifferente. Tali sono i voltmetri e gli amperometri termici od a dilatazione di filo (vedere paragrafo speciale sopra questi istrumenti) i voltmetri, gli amperometri ed i wattmetri elettrodinamici ecc.

Coll'analisi algebrica si dimostra che *il valore efficace di una corrente o di una f. e. m. è dato dalla radice quadrata della media dei quadrati dei valori istantanei in un periodo.*

Questa media è differente dalla *media aritmetica.*

Se la corrente è una sinusoide, il valore efficace è 0,707 il valore massimo istantaneo od ampiezza; ossia il valore massimo di una corrente o di una f. e. m. alternata è 1 : 0,707 ossia 1,41 il valore efficace. $(1{,}41 = \sqrt{2})$

Perciò quando si dice che una corrente alternata è di 100 Amp. o che una f. e. m. è di 1000 Volt ciò significa che la corrente varia da 0 a 141 Amp. positivi o negativi e che la f. e. m. varia da 0 a 1410 V. positivi o negativi.

La *media aritmetica* dei valori istantanei di una corrente o di una f. e. m. sinusoidale durante un semi periodo è espressa da $\frac{2}{\pi}$ ossia 0,6366 il valore massimo. Quindi il valore reale od efficace stà al valore medio aritmetico come 0,707 : 0, 6366; in altre parole il valore efficace è 1,11 il valore medio aritmetico.

$$\text{medio} = \frac{2}{\pi} \text{ massimo} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \text{ efficace}$$

Se la corrente non è una sinusoide il rapporto fra il valore efficace e il massimo è diverso da quello indicato. *Nell'esprimere l'intensità o la f. e. m. di una corrente alternata in ampère o in volt, si sott'intende sempre che i valori sono efficaci e non medi.*

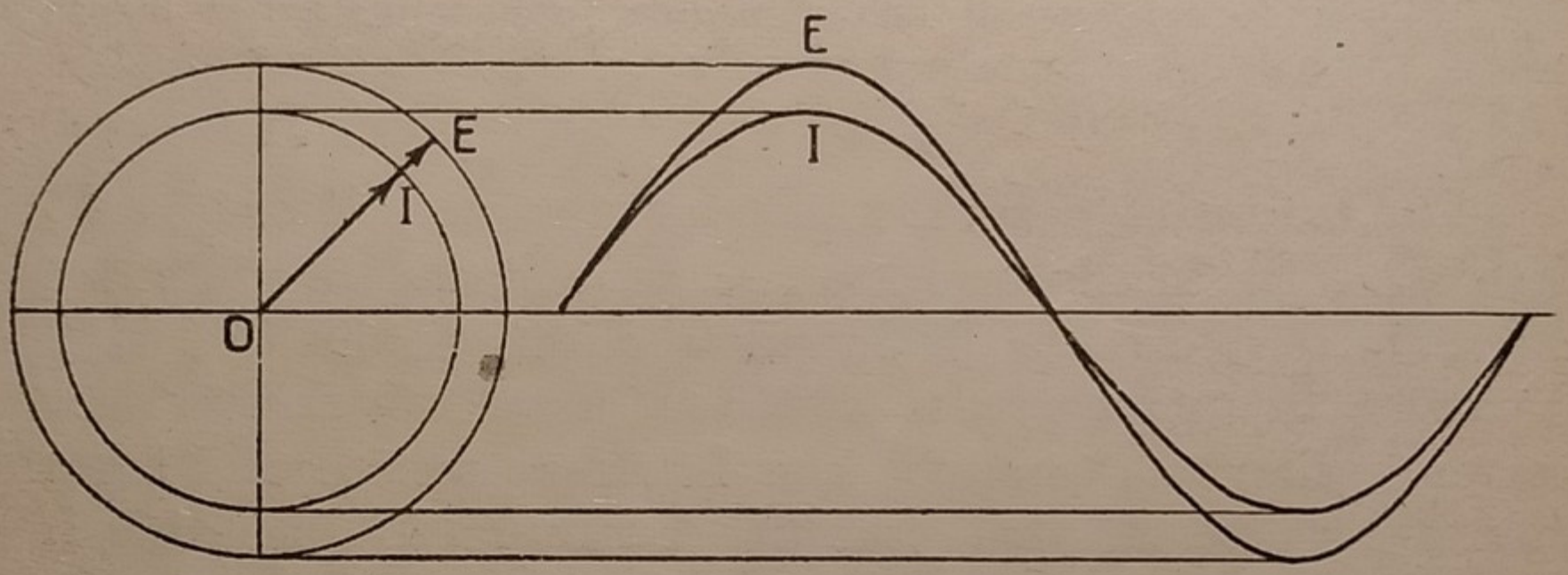


Fig. 125 - Sinusoidi della intensità e f. e. m. in fase fra loro.

Per spiegare perchè il valore efficace di una corrente alternata non è uguale al valore medio in un semi periodo, bisogna ricordare che l'effetto termico o di Joule in un conduttore è dato da RI^2 oppure da $\frac{E^2}{R}$ Cioè l'efficacia di una corrente è proporzionale a I^2 e quella di una f. e. m. a E^2. Se una corrente è variabile in un circuito la sua efficacia sarà istante per istante proporzionale a I^2 e quindi per fare la media generale bisogna fare la media dei quadrati ed estrarre la radice. Facendo la semplice media aritmetica si avrebbe un valore minore.

77. Comportamento della corrente alternata colle resistenze ohmiche. — Quando si applica una f. e. m. ad un

conduttore costituente una *resistenza ohmica in ogni istante* l'intensità sarà data dalla legge di Ohm ossia I = E : R, dove I è il valore istantaneo della corrente, E quello della f. e. m. ed R la resistenza. Quindi se la f. e. m. è *sinusoidale* anche la corrente dovrà essere rappresentata da una sinusoide; se invece la f. e. m. segue un'altra legge anche l'intensità seguirà la stessa legge. In ogni caso quando E diventa zero o massimo, anche I sarà nello stesso istante zero oppure massimo. (Figura 125).

In questo caso si dice che l'*intensità* e la *f. e. m.* sono in fase e la legge di Ohm si può applicare anche ai valori efficaci come se la corrente fosse continua. Ossia se E è la f. e. m. efficace ed I l'intensità si avrà:

$$I = \frac{E}{R}$$

ed inoltre si avrà:

$$\text{Watt} = \text{Volt} \times \text{Amp.} = \text{ohm} \times \text{amp.}^2$$

Ma se la resistenza R non è soltanto ohmica ma anche induttiva (parag. 70) allora nella resistenza R sorge e si forma una f. e. m. di autoinduzione pure alternata la quale si aggiunge o si sottrae alla caduta di tensione dovuta alla resistenza ohmica e modifica istante per istante la f. e. m. totale fra gli estremi del circuito considerato. In tal caso quindi la intensità della corrente non corrisponde più alla formola della legge di Ohm I = E : R.

78. Rappresentazione delle correnti alternate coi vettori. — Oltre alla rappresentazione grafica delle correnti alternate col metodo della ascisse ed ordinate che abbiamo descritto (sistema cartesiano) si adopera molto il *sistema vettoriale* più semplice e che serve ad analizzare i fenomeni anche più complessi quando in un circuito, apparecchio, macchina, agiscono diverse correnti, f. e. m., campi magnetici ecc. Il sistema cartesiano condurrebbe a disegni lunghi e complicati.

Nel sistema vettoriale ogni corrente o d. d. p. alternativa viene rappresentata con una retta OA (fig. 126) di lunghezza proporzionale al *valore massimo* od *ampiezza*. Si suppone

che la retta OA ruoti intorno al centro O con moto uniforme in ragione di un numero di giri al minuto secondo pari alla frequenza. Come abbiam visto al paragrafo 75 la proiezione OA_1 del vettore OA sopra una verticale rappresenta il valore istantaneo della corrente e della f. e. m. nel momento in cui,

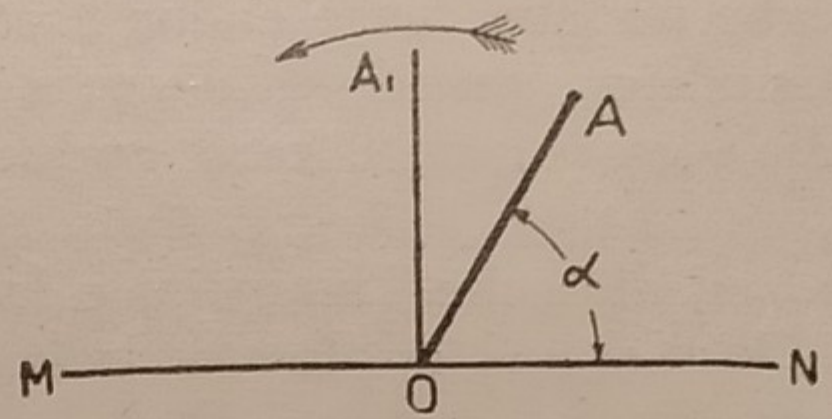


Fig. 126 - Diagramma vettoriale di una grandezza alternativa.

partendo da ON, forma un angolo α coll'asse orizzontale MN.

Generalmente si considera come senso di rotazione positivo quello *sinistrorso* cioè contrario alla rotazione delle sfere degli orologi. (fig. 126 e 128).

Ciò che importa di analizzare nei circuiti a corrente alternata dove agiscono più correnti o f. e. m. sono le reciproche influenze e le risultanti. Ora siccome nei casi più comuni di applicazione sia le correnti che le f. e. m. agenti in un circuito

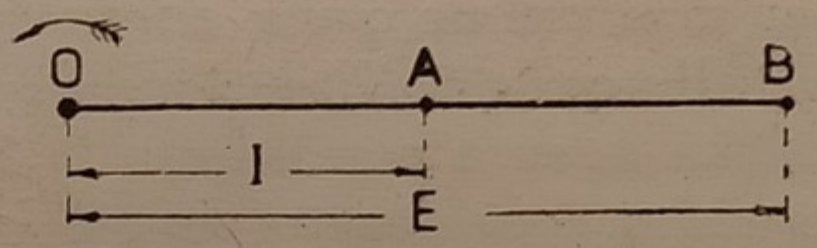


Fig. 127 - Vettori in fase di I, di E.

hanno la stessa frequenza, così il concetto della rotazione dei vettori perde importanza. Così semplificata, la rappresentazione delle f. e. m. intensità, campi magnetici, agenti in un circuito o in una macchina (motore, trasformatore) si riduce al tracciamento di tanti vettori uscenti da un punto. Le lunghezze dei vettori che rappresentano le grandezze alternative si disegnano in scala prescelta e proporzionali ai *valori massimi od ampiezze* od anche ai *valori efficaci*. Si dimostra allora facilmente come la composizione e decomposizione dei vettori si riduce esattamente a problemi di composizione e decomposizione di forze applicate ad un punto ed agenti in un piano. Per chiarire meglio facciamo alcuni esempi.

Se una corrente ed una f. e. m. agente in un circuito sono tali che coincidono gli istanti di zero e di massimo, i rispettivi vettori saranno rappresentati da rette sovrapposte, di lunghezza proporzionale agli amp. o ai volt. (Fig. 127).

Si dice che la intensità e la f. e. m. sono in fase tra loro: (caso di una resistenza ohmica).

Ma se due o più correnti o f. e. m. alternate pur essendo della stessa frequenza, sono rappresentate da sinusoidi non coincidenti negli istanti di massimo o di zero, allora i rispettivi valori sono rappresentati da vettori divergenti. (Fig. 128).

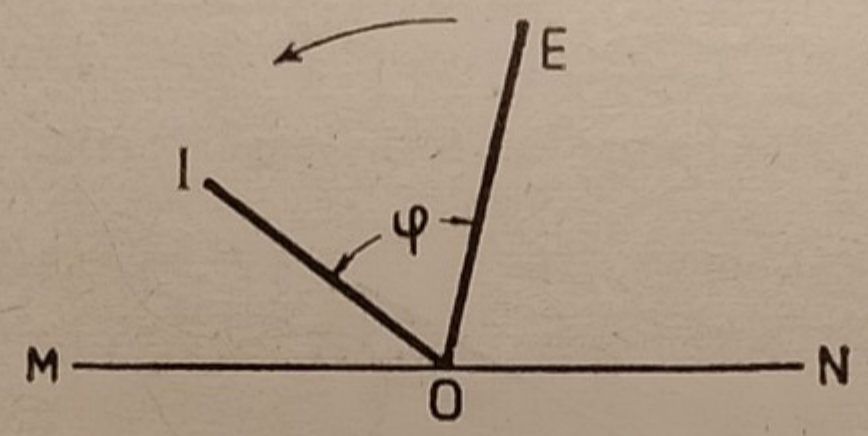


Fig. 128 - Vettore di una intensità in anticipo rispetto alla f. e. m.

Si dice allora che le due grandezze sono *spostate di fase* (*o sfasate*). L'angolo φ compreso fra due vettori che rappresentano l'intensità e la tensione di uno stesso circuito misura lo *sfasamento o spostamento* di fase. Nella figura il vettore I è in anticipo ad E.

Se nello stesso circuito agiscono due o più f. e. m. alternate esse daranno luogo a una f. e. m. unica risultante pure alternata. Cioè se due o più f. e. m. sono rappresentate da sinusoidi della stessa frequenza la somma o la differenza dei valori istantanei dà luogo ad una sinusoide. Quindi la f. e. m. risultante potrà essere rappresentata pure da un vettore. E' facile dimostrare che il vettore risultante si può ottenere facendo la composizione dei singoli vettori della stessa specie come se fossero delle forze ed impiegando la regola del parallelogramma o del poligono funicolare.

In generale si dice somma di due vettori la loro composizione colla regola del parallelogrammo. Prima di disegnare i vettori componenti si fissa la direzione di rotazione (generalmente sinistrorsa) e si mettono avanti quelli che rappresentano f. e. m. o intensità in anticipo.

In queste operazioni di composizione dei vettori è necessario far bene osservazione alla *direzione*. Quando per esempio si deve trovare una f. e. m. risultante attiva, atta cioè a vincere diverse f. e. m. agenti nel circuito, è necessario considerare queste ultime forze elettromotrici come negative. Così la perdita ohmica di una resistenza si deve sempre ritenere in fase colla corrente, ma come una forza controelettromotrice

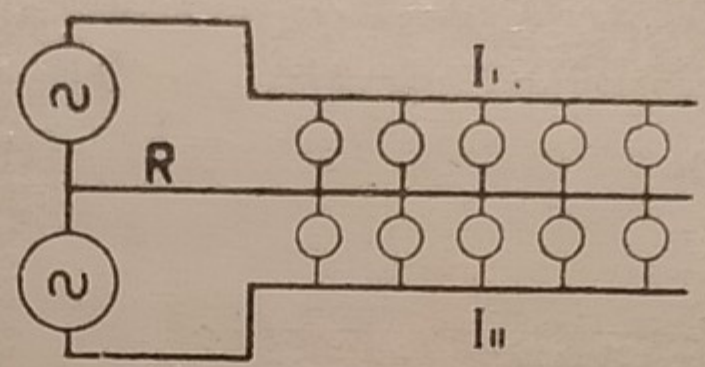


Fig. 129 . Alternatori in serie per circuito a tre fili.

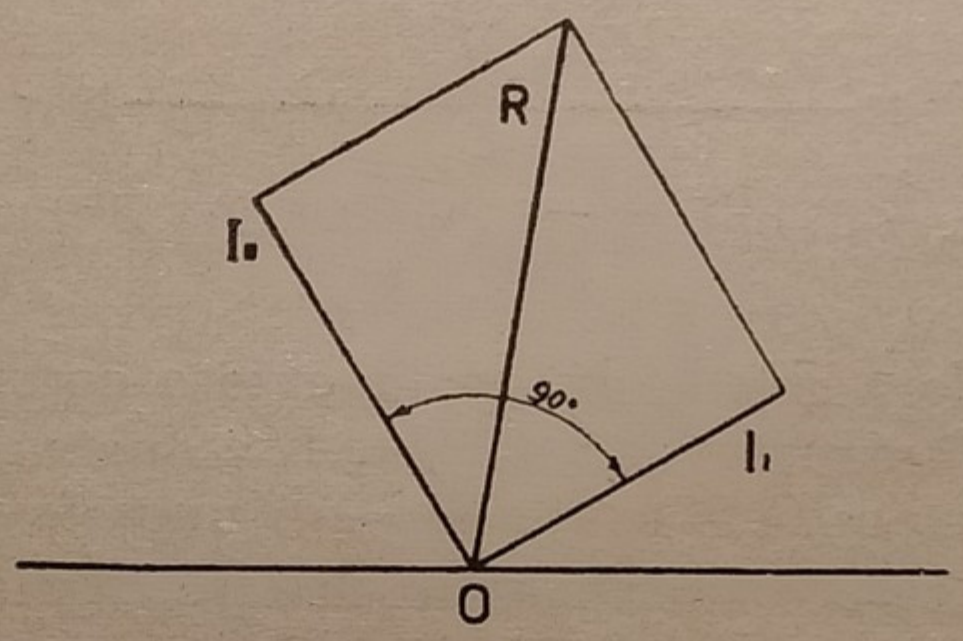


Fig. 130 - Diagramma vettoriale di una somma.

ossia come una componente negativa. Così pure si devono prendere come negative le f. e. m. di autoinduzione. Invece la f. e. m. applicata alla estremità di un circuito e che fa equilibrio alle d. d. p. che si sviluppa nel medesimo, per esempio alla caduta di resistenza, è da considerarsi positiva.

ESEMPI. — 1.° Due alternatori sono disposti in serie fra loro in modo d'avere un filo comune di ritorno R (Fig. 129).

La corrente I_1 è in ritardo di 90° rispetto la I_2. L'intensità di I_2 è di 50 A e quella di I_1 di 25 A. Disegnare il diagramma vettoriale.

Per disegnare il diagramma si traccino due rette OI_1 e OI_2 di lunghezza rispettivamente di 25 e 50 mm. ad angolo retto. Essendo il senso sinistrorso I_2 si disegna in avanti rispetto I_1. Si fa la composizione secondo la regola del parallelogramma e si ottiene R = 56 Ampère.

Tale risultante riesce in ritardo rispetto a I_2 ed in anticipo rispetto a I_1.

ESEMPIO. — 2.° In un circuito sono inserite due bobine in serie (Fig. 131) in cui si formano due f. e. m. indotte E_1 ed E_{11} spostate di 120° fra loro. Disegnare il diagramma vettoriale.

R. — Supposto E_{11} in anticipo rispetto a E_1 si disegnano due vettori disposti a 120° e di lunghezza proporzionale a E_{11} e E_1. Quindi si completa il parallelogrammo e si ottiene la risultante Er la quale riesce in anticipo rispetto a E_1 e in ritardo rispetto a E_{11}

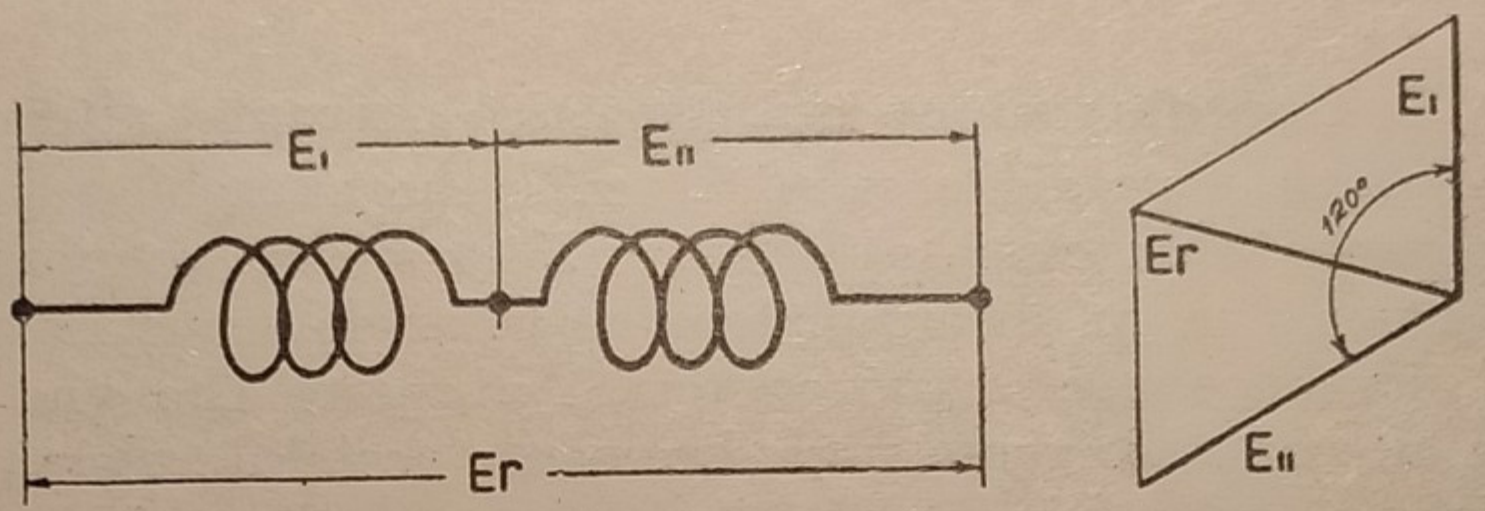


Fig. 131 - Due bobine induttive in serie e diagramma vettoriale.

Lo spostamento di fase fra due sinusoidi rappresentanti correnti e f. e. m. alternate si può esprimere, oltre che dall'angolo compreso fra i rispettivi vettori ruotanti, anche colla frazione di periodo che vi è fra i due tempi zero delle sinusoidi. (Fig. 132).

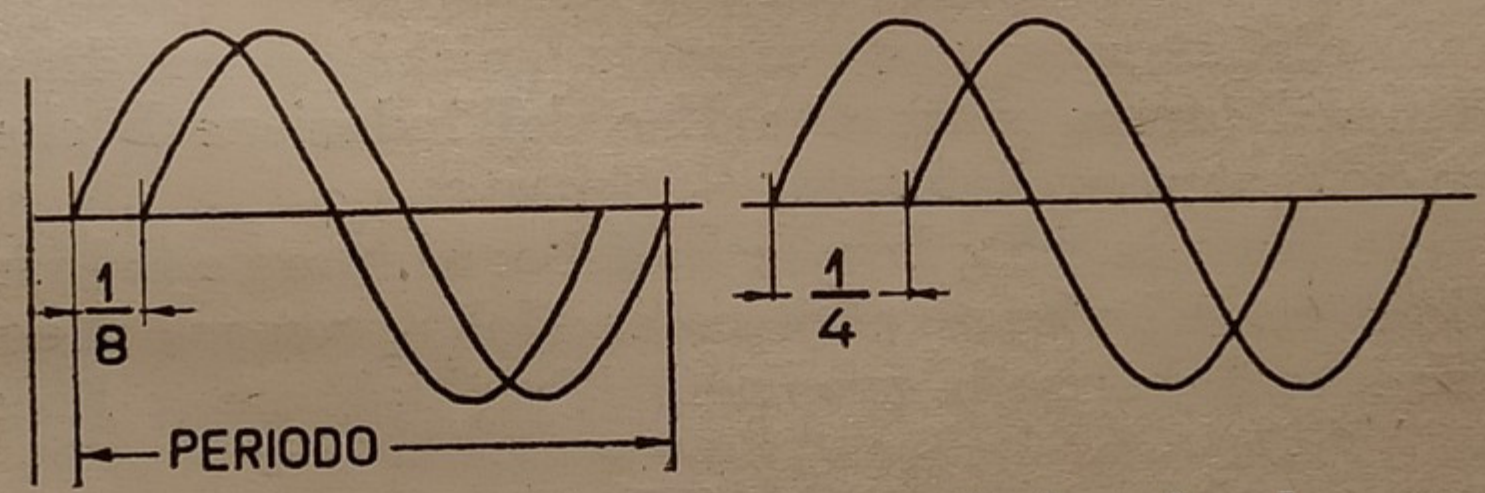


Fig. 132 - Espressione dello spostamento di fase fra due grandezze sinusoidali di $\frac{1}{8}$ e di $\frac{1}{4}$.

Così ad esempio:

Uno spostamento di 45° equivale a 1/8 di periodo
» 90° » 1/4 »
» 120° » 1/3 »
» 180° » 1/2 »

La stessa dicitura si applica per esprimere non solo lo sfasamento fra due correnti alternate o fra due f. e. m., ma altresì

fra la f. e. m. e l'intensità in uno stesso circuito. Si dice ad esempio che una corrente è spostata (in ritardo od in anticipo) di un quarto di periodo rispetto alla f. e. m.; ciò significa che quando la tensione è zero, la intensità è massima e viceversa. Quando vi è uno spostamento di 180° si dice che le due sinusoidi sono in opposizione.

79. L'autoinduzione nei circuiti a corrente alternata. — Abbiamo visto ai paragrafi 70 e 71 che allorchè una corrente varia in *un circuito induttivo* si forma contemporaneamente una f. e. m. di autoinduzione la quale segue le stesse leggi d'induzione elettromagnetica. Ne deriva che una corrente alternata, corrente periodicamente variabile, dovrà dar origine nei circuiti induttivi ad una f. e. m. di autoinduzione pure alternata. La grandezza di tale f. e. m. indotta è proporzionale:

a) alla frequenza, poichè sappiamo che la f. e. m. di induzione è proporzionale alla velocità di variazione del flusso induttore e quindi della corrente inducente. Aumentando la frequenza si aumenta naturalmente la velocità di variazione della corrente, del campo, ecc.

b) alla intensità della corrente, poichè da essa dipende il valore del campo magnetico H o dell'induzione B che dà origine ai fenomeni induttivi;

c) e dipende dalla lunghezza del conduttore o dal numero delle spire, se è piegato a solenoide; dalla presenza di nuclei di ferro i quali hanno la proprietà di moltiplicare le linee di forza.

In un circuito composto da una resistenza e da autoinduzione si devono considerare: 1.° la f. e. m. Eo assorbita dalla resistenza ohmica R del circuito conformemente alla legge di Ohm; 2.° la f. e. m. Es_1 di selfinduzione; 3.° la d. d. p. Er risultante dalle prime due e che si dice *tensione applicata* e che è quella che effettivamente si può misurare con un voltmetro fra le estremità della resistenza induttiva. Queste tre f. e. m. saranno rappresentate dalle tre sinusoidi della fig. 133.

In questa figura la sinusoide che rappresenta la d. d. p. Eo dovuta alla resistenza ohmica è in fase con quella della intensità I (come è dimostrato al parag. 77); invece quella dovuta all'autoinduzione è zero quando I e cioè il campo ma-

gnetico è massimo e cioè nel momento in cui detto campo non varia. Viceversa la f. e. m. di autoinduzione sarà massima quando I = 0 poichè in quell'istante la velocità di variazione del campo magnetico creato dalla corrente è massima.

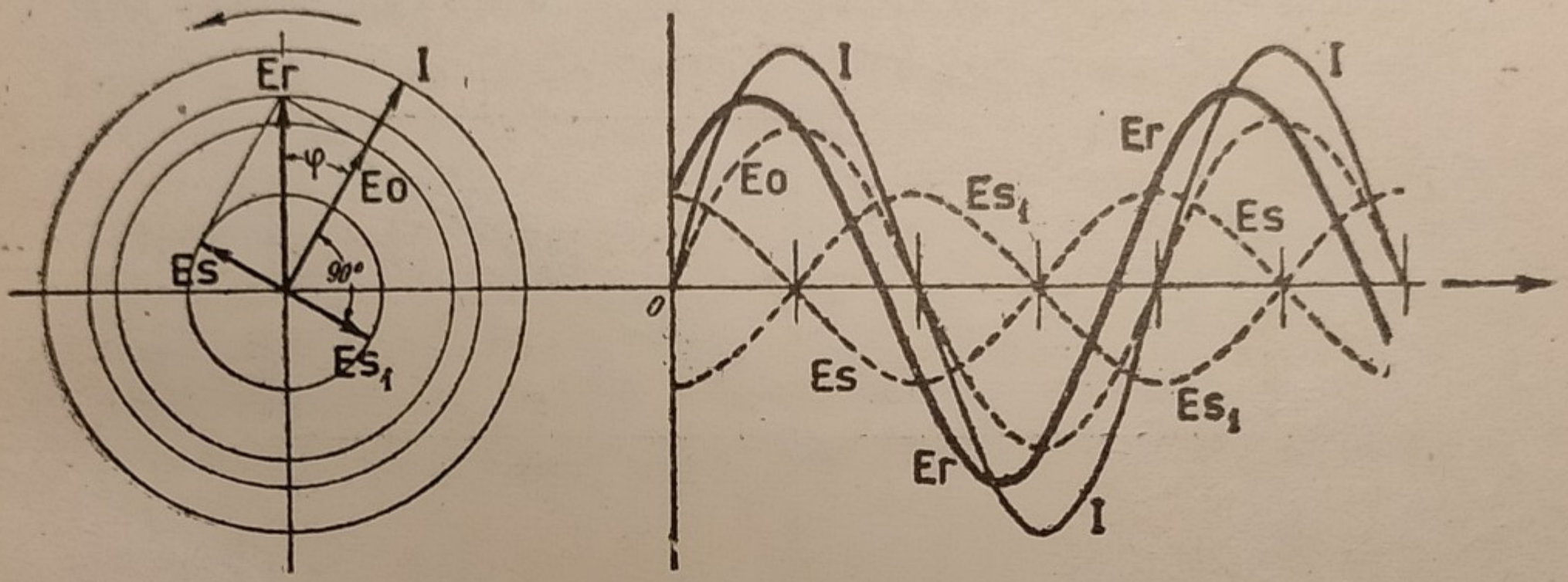


Fig. 133 - Dimostrazione grafica del ritardo della intensità rispetto alla f. e. m.

Ne risulta che la f. e. m. di selfinduzione Es_1 è in ritardo di un quarto di periodo rispetto a Io rispetto al flusso magnetico Φ sincrono ad I.

Nella figura 133 può sorgere il dubbio quale delle due sinusoidi Es ed Es_1 rappresenti la vera f. e. m. di selfinduzione. Per sciogliere il dubbio ricorriamo alla legge di Lenz; nel punto di origine O della sinusoide I essa prende a crescere positivamente, quindi per la suddetta legge la f. e. m. indotta dovrà essere diretta in senso da opporsi all'incremento di I cioè dovrà essere negativa; perciò la curva della f. e. m. di self. è la Es_1.

La tensione applicata ai capi del circuito ossia la risultante Er *sarà la somma aritmetica istante per istante delle due f. e. m. Eo e* Es_1 prendendo però quest'ultima in senso contrario (e cioè prendendo la Es) perchè la f. e. m. da imprimere al circuito deve fare equilibrio alla Es_1 e cioè deve essere istante per istante opposta. Eseguendo la composizione di Eo e Es si ha la sinusoide Er in anticipo di fase rispetto a quella della intensità I.

Lo stesso risultato si ottiene applicando la rappresentazione coi vettori, conformemente alla fig. 134.

Si tracci sopra una orizzontale OI vettore della intensità un segmento OA rappresentante la f. e. m. necessaria a vincere la resistenza ohmica Eo del circuito. Con una retta OC perpendicolare a I si indichi il valore della f. e. m. di selfinduzione Es in ritardo di 90° rispetto alla I. La f. e. m. in senso contrario OD uguale a OC rappresenterà quella necessaria per

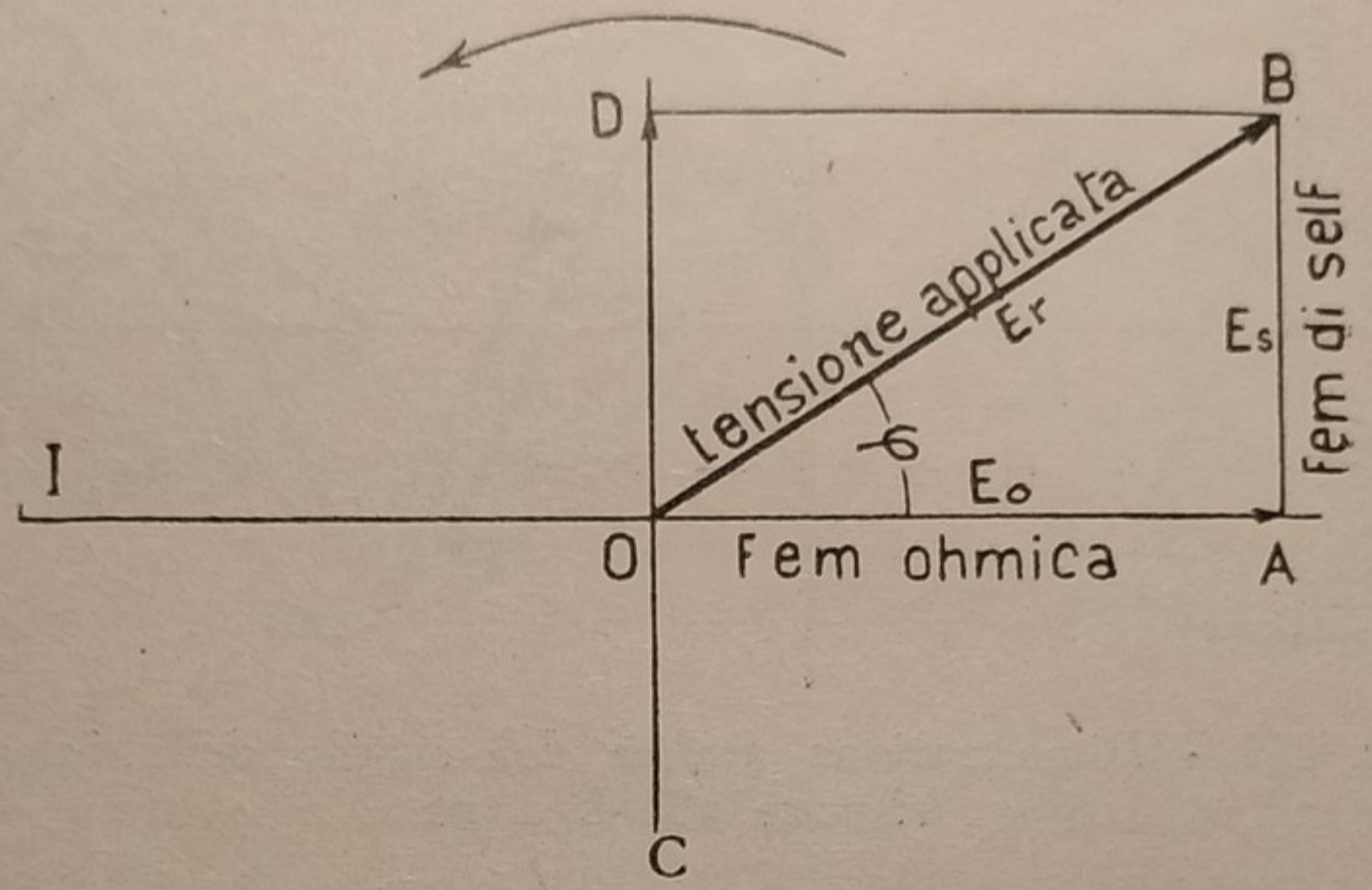


Fig. 134 - Diagramma vettoriale della f. e. m. in un circuito induttivo. (Rotazione sinistrorsa).

far equilibrio alla medesima. La f. e. m. risultante od applicata all'estremità del circuito Er sarà data dalla risultante dei due vettori OA e OD conformemente alle regole di composizione delle forze. La risultante OB riesce sempre spostata in avanzo rispetto alla intensità OA.

L'angolo φ fra il vettore della intensità e della tensione OB impressa rappresenta lo spostamento in ritardo della corrente.

Dal triangolo OAB si cava:

$$E_o = E_r \cos \varphi$$
$$E_s = E_r \operatorname{sen} \varphi$$

formole che danno il modo di calcolare la f. e. m. attiva e quella di selfinduzione quando si conosca la d. d. p. del circuito e l'angolo φ.

Riassumendo: nei circuiti induttivi la corrente alternata rimane in ritardo di un certo angolo rispetto alla f. e. m.

applicata alle estremità. Tale angolo si può determinare disegnando un triangolo rettangolo di cui un cateto ha una lunghezza proporzionale alla f. e. m. dovuta alla resistenza ohmica ossia = R × I (R resistenza in ohm, I intensità efficace in ampère); e l'altro cateto ha una lunghezza proporzionale alla f. e. m. di auto induzione. L'ipotenusa rappresenterà in lunghezza e in fase la tensione risultante od applicata al circuito.

80. Espressione della forza elettromotrice di autoinduzione. — Abbiamo visto al parag. 71 che chiamando $I_1 - I_2$ la variazione dell'intensità in amp. — L il coefficiente di autoinduzione in Henry — *es* la f. e. m. di *a.i.* — *t* il tempo in 1" in cui dura la variazione dell'intensità, la f. e. m. *es* media fra le estremità del circuito, supposto zero la resistenza ohmica è:

$$e_s = L \frac{I_1 - I_2}{t}$$

Consideriamo un mezzo periodo di sinusoide di una corrente alternata; se i_m è la intensità massima in ampère, la variazione è da $+ i_m$ a $- i_m$ ossia $2 i_m$ Chiamando T la durata di un periodo avremo che la f. e. m. *media* in un semiperiodo sarà:

$$e_s \text{ (medio)} = L \frac{2 i_m}{\frac{T}{2}} = 4 L \frac{i_m}{T}$$

Se f è la frequenza (periodi in un 1") sarà $T = \frac{1}{f}$

$$e_s = 4 L i_m f$$

Ma al paragrafo 76 abbiamo visto che il valor medio è $\frac{2}{\pi}\sqrt{2}$ il valore efficace, perciò:

$$e_s \text{ (medio)} = \frac{2}{\pi}\sqrt{2} \times E_s \text{ (efficace)}$$

Sostituendo si ha:

$$\frac{2}{\pi}\sqrt{2}\, E_s = 4 L I \sqrt{2} f$$

da cui:

$$E_s = 2 \pi f I L \qquad (1)$$

Questa formola esprime la caduta di tensione dovuta soltanto all'effetto di inerzia del campo magnetico creato nel suo percorso dalla corrente I, e che è affatto indipendente dalla caduta di tensione provocata dalla resistenza ohmica. Moltiplicando per I entrambi i termini, il secondo dei due esprime la *potenza apparente* del flusso magnetico alternativo.

Se il circuito induttivo è formato da una spirale senza ferro allora per la formola al parag. 71 si ha:

$$L = \frac{4 \pi N^2}{l} S \, 10^{-9}$$

Se si tratta di elettromagnete (trasformatore, bobine di reattanza con nucleo di ferro):

$$L = \frac{4 \pi N^2}{R_i} 10^{-9} \text{ dove } R_i = \text{riluttanza} = \frac{l}{\mu S}$$

Queste formule servono alla calcolazione di Es pei circuiti induttivi che si riscontrano frequentissimi nella pratica.

81. Impedenza o resistenza apparente. — La f. e. m. di autoinduzione si può interpretare come una resistenza al passaggio della corrente concomitante alla resistenza ohmica ma con diverso effetto. La intensità I di corrente che si forma in un circuito induttivo sarebbe il risultato, conforme alla Legge di Ohm, della f. e. m. *impressa* o *applicata* alla estremità del medesimo e di una *resistenza apparente* che si chiama *impedenza*. Quest'ultima sarebbe formata dall'effetto combinato dalla resistenza ohmica R e da quella della f. e. m. di selfinduzione. Cioè si avrebbe:

$$\text{Impedenza} = \frac{\text{tensione applicata}}{\text{intensità}} = Z$$

L'impedenza si esprime sempre nelle formole col simbolo Z e si misura in ohm.

Come per le forze elettromotrici l'impedenza è data dall'ipotenusa di un triangolo rettangolo di cui un cateto è lungo R (in una determinata scala per esempio un millimetro ogni ohm), l'altro cateto è lungo $2 \pi f$ L. in cui $\pi = 3{,}1416$, f è la frequenza e L il coefficiente di selfinduzione. (Fig. 135). Il valore 2π L f si dice *reattanza* e si indica generalmente nelle formole con X; essa si misura in ohm.

Moltiplicando per l'intensità I i tre cateti si ritorna ad avere il triangolo delle f. e. m. di cui alla fig. 134.

Da questa costruzione geometrica risulta:

a) che la impedenza essendo ipotenusa è sempre maggiore del cateto e cioè della resistenza R; ciò equivale a dire che la *auto induzione rappresenta una maggior resistenza alla corrente*. Cioè le resistenze induttive fanno aumentare e possono sostituire le resistenze ohmiche nei circuiti a corrente alternata;

b) Dal triangolo di cui alla fig. 135 si deduce che l'angolo φ di ritardo della fase della intensità rispetto alla f. e. m. aumenta colla frequenza f e con L e diminuisce aumentando R. Se R fosse piccolissimo in confronto del valore $2 \pi f$ L (reattanza) il ritardo di fase diventerebbe di 90° cioè la sinusoide della intensità sarebbe in ritardo di 1/4 di periodo.

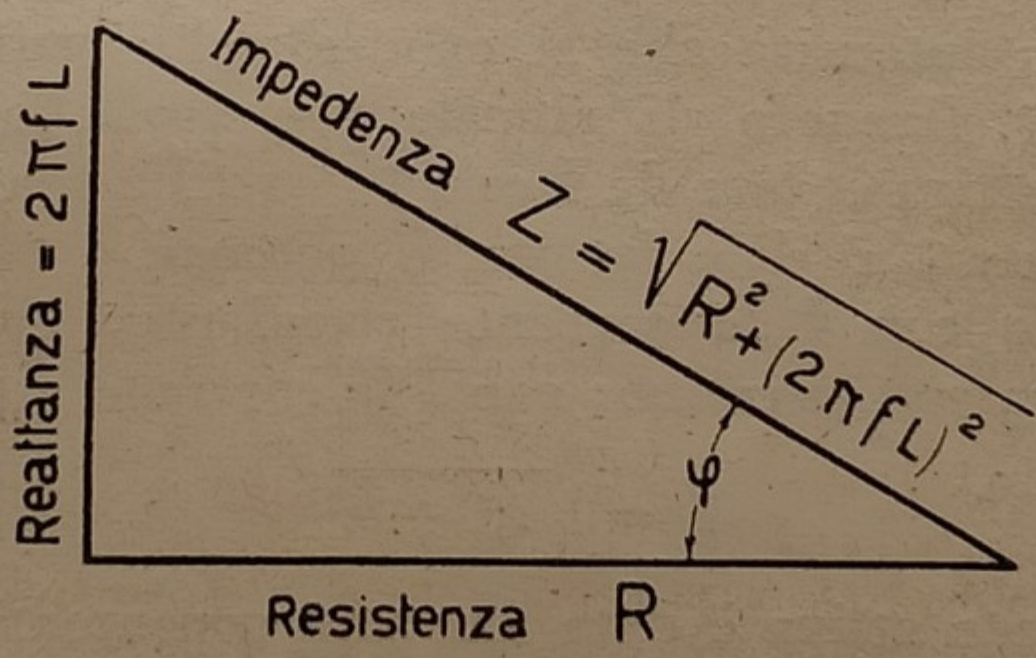


Fig. 135 - Diagramma della impendenza, reattanza e resistenza di un circuito induttivo.

La reattanza non si deve considerare come una resistenza che consuma energia, nello stesso modo che la resistenza di inerzia offerta da un volano sottoposto ad un moto alternativo non si può considerare come una forza d'attrito. La forza di

attrito consuma energia e si tramuta in calore; la resistenza di inerzia no.

La reattanza si deve considerare come l'inerzia di un volano soggetto a una forza e moto oscillante.

Dal triangolo della fig. 135 si deduce:

$$\text{Resistenza } R = Z \cos \varphi$$

$$\text{Reattanza } X = Z \operatorname{sen} \varphi = 2 \pi f L$$

$$2 \pi f L = X = R \operatorname{tg} \varphi = R \frac{\operatorname{sen} \varphi}{\cos \varphi} = R \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (2 \pi f L)^2}$$

82. Corrente reattiva o di magnetizzazione. — Ecco una terza interpretazione dei fenomeni induttivi: La corrente che circola nei circuiti induttivi (per esempio di alimentazione di motori, di trasformatori a vuoto, ecc.) si deve sempre considerare composta di due *componenti*: 1.° Una corrente attiva che è quella che produce lavoro e cioè quella che moltiplicata per la f. e. m. del circuito da i *watt consumati*. 2.° Una corrente *inattiva* o *reattiva* o di *magnetizzazione* in ritardo di 90° rispetto alla prima e che serve a produrre i campi magnetici origine dei fenomeni di selfinduzione.

Se I è la intensità che si misura nel circuito (intensità efficace) e φ l'angolo di ritardo rispetto alla f. e. m. la componente attiva è data da I *cos* φ; quella reattiva da I *sen* φ. Il valore *cos* φ si dice *fattore di potenza*.

Indicando con I la corrente circolante; con i_0 la componente di magnetizzazione; con i la corrente attiva si ha:

$$I = \sqrt{i_0^2 + i^2}$$

La corrente attiva è data dai watt consumati dal circuito (rilevati col wattmetro) divisi per la tensione di estremità: W : E

La corrente di magnetizzazione degli elettromagneti si può determinare partendo dalla formola a parag. 58:

$$B = \frac{L \pi N i_0}{10 l} \mu$$

essendo *B il valore massimo* d'induzione.

Al posto di i_0 bisogna sostituire, trattandosi di corrente alternata il valore efficace $\sqrt{2}\, i_0$.

Sostituendo si cava il valore di i_0 *efficace*

$$i_0 = \frac{B\ l}{\mu\ N\ 1.78}$$

per circuiti magnetici completamente chiusi

$$i_0 = \frac{B}{1{,}78\ N}\ \frac{l}{\mu} + \delta\Big)$$

circuiti magnetici semichiusi.

In queste formole l indica la lunghezza in cm; μ la permeabilità; δ lo spessore dell'interferro se il circuito è semichiuso; B l'induzione massima nel ferro; N il numero delle spire. La permeabilità si può calcolare colla relazione $\mu = B : H$ e B dalla formola al paragrafo seguente n. 83 e la forza magnetizzante H colla formola $H = \frac{4\ \pi}{10}$ As essendo As le amper-spire del circuito che si considera oppure in via approssimativa colla tabella N. 16 a parag. 84.

La corrente di magnetizzazione si chiama con questo nome perchè è quella che crea il flusso magnetico ed è in fase con esso. Il vettore di questa corrente è in ritardo di 90° rispetto alla f. e. m. indotta.

La componente reattiva prodotta generalmente dai motori degli stabilimenti rappresenta un aumento ed un ingombro delle linee di trasmissione; questo aumento della intensità obbliga a tenere una maggior sezione quindi un maggior costo, nei fili di trasmissione e a installare macchine e trasformatori pure di maggior peso e di maggior costo.

ESERCIZI

1.° — Una linea di trasmissione alimenta uno stabilimento industriale il quale consuma 200 amp. con fattore di potenza cos $\varphi = 0{,}7$. Si domanda quale è la componente attiva, quale la componente di magnetizzazione e quale la perdita di energia in linea se fosse cos $\varphi = 1$ cioè se lo stabilimento consumasse la sola corrente attiva.

R. — Al fattore cos $\varphi = 0{,}7$ corrispoude $\varphi = 45^0$ quindi sen $\varphi = 0{,}7$. In questo caso la componente attiva e quella reattiva sono uguali a $200 \times 0{,}7 = 140$ amp. La perdita di energia nei conduttori (legge di Joule) è proporzionale al quadrato dell'intensità; quindi se lo stabilimento consumasse soltanto la corrente attiva di 140 amp. si avrebbe una perdita nei fili di energia ridotta al:

$$\frac{200^2}{140^2} = \frac{100}{x} \text{ da cui } x = \frac{140^2 \times 100}{200^2} = 49 \text{ per cento}$$

cioè si risparmierebbe il 50% circa della perdita di energia in linea.

2.° — Una resistenza induttiva senza ferro è formata da rocchetto con 800 spire di filo della sezione di 1 mmq. Il rocchetto è lungo 40 cm. ed ha il cavo interno di 8 cent. di diametro. Si domanda il coefficiente di autoinduzione e la f. e. m. impressa alle estremità della spirale con corrente alternata a 42 periodi di valore generico I ampère.

R. La resistenza ohmica del filo, essendo 800 le spire e m. 0,25 la lunghezza di ogni spira sarà:

$$R = 0{,}018 \frac{800 \times 0{,}25}{1} = 3{,}6 \text{ ohm}$$

dove 0,018 è la resistività del filo di rame.

Il coefficiente di autoinduzione, conformemente alle formole del paragrafo 71 sarà:

$$L = \frac{4\ \pi\ 800^2}{40}\ 50 \times 10^{-9} = 0.01 \text{ Henry}$$

nella quale formola 40 è la lunghezza del rocchetto in cm. e 50 la sezione interna in cmq.

La forza elettromotrice di autoinduzione sarà data da:

$$Es = 2\ \pi\ n\ L\ I = 2 \times 3{,}14 \times 42 \times 0{,}01 \times I = 2{,}64 \times I \text{ volt}$$

mentre la caduta di tensione dovuta alla resistenza ohmica è di RI ossia 3,61 (Fig. 136).

Costituendo il triangolo delle forze elettromotrici si ha:

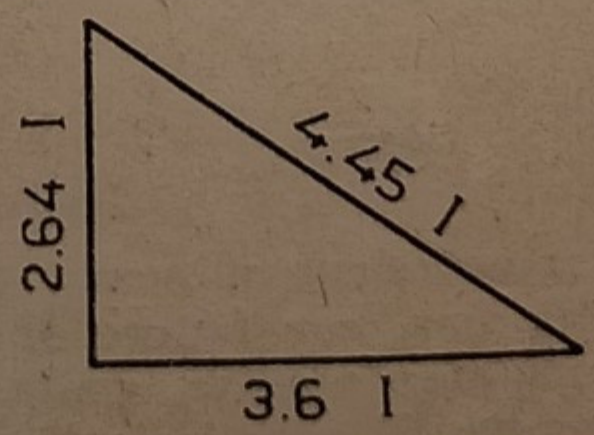


Fig. 136 - Rettangolo delle tensioni.

Si ottiene che l'ipotenusa è lunga 4,45 ossia la f. e. m. impressa sarà 4,45 I. Per esempio se I è di 5 Amp. si dovrà applicare $5 \times 4,45 = 22,2$ volts.

3.° Applicando una f. e. m. alternata a 50 periodi ad un rocchetto d'impedenza (resistenza induttiva) che ha una resistenza ohmica di 20 Ohm ed un coefficiente di *a i* di 0,06 Henry, si produce una corrente di 0,6 amp. Trovare il valore dell'impedenza, della f. e. m. impressa e dello sfasamento.

R. — L'impedenza Z è data da:

$$Z = \sqrt{R^2 + (2 \pi f L)^2} = \sqrt{20^2 + (2 \times 3,14 \times 50 \times 0,06)^2} = 27,42 \text{ ohm}$$

La f. e. m. impressa:

$$E = Z I = 27,42 \times 0,6 = 16,45 \text{ volt}$$

Il coseno dell'angolo di spostamento, detto fattore di potenza è dato:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{20}{27,42} = 0,729 \text{ a cui corrisponde } \varphi = 40^0.$$

4. Facendo passare 10 Amp. a 50 periodi per una resistenza induttiva si trovano agli estremi 35 volt. Invece facendo passare una corrente continua di pari intensità si trovano 28 V. Qual'è il coefficiente di autoinduzione?

R. La caduta di tensione colla corrente continua è dovuta alla sola resistenza ohmica e per la legge di Ohm avremo:

$$R = E : I = 28 : 10 = 2,8 \text{ ohm}$$

Colla corrente alternata si ha una resistenza apparente di:

$$Z = 35 : 10 = 3,5 \text{ ohm}$$

Costruendo il triangolo rettangolo che ha per ipotenusa 3,5 e per un cateto 2,8 si trova che il secondo cateto, rappresentante la reattanza è lungo 2,1. Dalla formola che dà la reattanza si ha:

$$2 \pi f L = 2.1 \qquad \text{da cui} \qquad L = 0.00067 \text{ henry}$$

Dallo stesso triangolo si desume:

$$\cos \varphi = 0,8 \qquad \text{ossia} \qquad \varphi = 37^0$$

Problemi da risolvere:

1. Un circuito induttivo ha una resistenza ohmica di 2 ohm ed un coefficiente di autoinduzione L = 0,01 Henry ed è percorso da una

corrente colla frequenza 50. Trovare la reattanza, l'impendenza e lo sfasamento.

2. Trovare l'intensità della corrente e lo spostamento di fase in un circuito induttivo di 2 ohm di resistenza in cui L = 0,02 Henry ed applicando una f. e. m. alternativa di 70 V alla frequenza 50.

3. Un rocchetto di filo ha una resistenza ohmica di 2 ohm. Applicando una tensione di 15 Volt alternati a 42 periodi ed inserendo un amperometro si legge una corrente di 2,5 Amp. Trovare il coefficiente L di selfinduzione e l'angolo di sfasamento.

83. Forza elettromotrice indotta in un avvolgimento a spirale da un flusso magnetico alternativo. — Consideriamo un avvolgimento fisso formato da N spire (solenoide) sia in aria che sopra un nucleo di ferro e supponiamo di creare con un mezzo qualsiasi un flusso magnetico alternativo nel cavo dell'avvolgimento. Si formerà per legge di induzione una f. e. m. autoindotta pure alternata.

Lo stesso fenomeno preciso avviene se noi facciamo girare una matassa di N spire in un campo magnetico uniforme.

In entrambi i casi la f. e. m. istantanea è proporzionale alla velocità di variazione del flusso e, se questa è fatta secondo una legge sinusoidale, avremo che la f. e. m. sarà zero quando il flusso passa per il massimo, istante in cui non vi è variazione; e sarà massima quando il flusso ha la massima variazione ossia quando passa per la inversione ossia per lo zero.

La f. e. m. *media* indotta nelle N spire è espressa in unità assolute o C. G. S. dalla velocità di variazione delle linee di forza riferite al 1". In ogni mezzo periodo il flusso varia da $+ \Phi_m$ a $- \Phi_m$ ossia $2 \Phi_m$ nel tempo $\frac{T}{2}$ dove T è la durata di un periodo. Quindi la f. e. m. *media* nella N spira sarà espressa (parag. 71):

$$e = \frac{2 \Phi_m}{\frac{T}{2}} N = \frac{4 \Phi_m}{T}$$ dove Φ_m è il flusso massimo (ampiezza)

Ma $\frac{1}{T}$ esprime la frequenza *f*. Inoltre il valore efficace della f. e. m. è 1,11 il valore medio (parag. 76).

Infine i volt efficaci equivalgono a 10^{-8} delle unità assolute. Applicando questi valori nell'ultima formula si ha che la f. e. m. E efficace espressa in volt diventa:

$$E = 4{,}44\ \Phi_m\ f\ N\ 10^{-8} \qquad (1)$$

formola importantissima che si adopera per la calcolazione dei trasformatori e anche per le *bobine di selfinduzione* o di autoinduzione *poichè la f. e. m. E non è altro che la f. e. m. di auto induzione che nella formola al parag.* 80 *abbiamo indicato con Es.* Le due formole quindi si equivalgono benchè formate con grandezze diverse.

La formola (1) è esatta se il flusso magnetico ha un andamento sinusoidale: ma se esso segue una legge diversa, invece del coefficiente 4,44 si ha un coefficiente K diverso. Per esempio se il flusso magnetico segue un andamento rettangolare come alla fig. 137 si ha K = 4. Se invece segue un andamento triangolare K = 4,62.

Il flusso Φ_m della formola (1) è dato da

$$\Phi_m = s \times B_m$$

dove *s* è la sezione del nucleo di ferro in cmq. e B_m il numero delle linee di forza per cmq. Tale numero si tiene di solito fra 6000 e 12000 e può raggiungere al massimo 15000. Se l'avvolgimento a spirale è senza nucleo, *s* esprime la sezione vuota interna; la formola (1) in questo caso è valevole solo se l'avvolgimento è avvolto come un cilindro lungo almeno 20 volte il diametro.

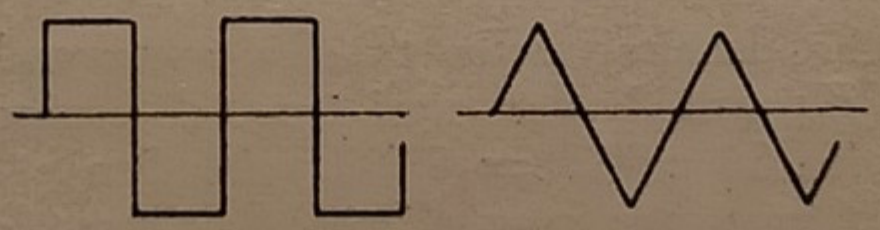


Fig. 137 - Forme limiti della corrente alternata.

La tabella che segue dà f. e. m. indotta per *spira* negli avvolgimenti sopra nuclei di ferro a circuito magnetico chiuso con correnti alternate a 50 periodi. Con tale tabella si può calcolare rapidamente la sezione del nucleo oppure i volt efficaci che si svolgono in ciascuna delle dette N spire. Essa è cavata dalla formola (1) in cui è stato sostituito a *f* il valore di 50; N = 1; e a Φ_m il valore di Bm per un centimetro quadrato di sezione.

Per frequenze diverse da 50 le tensioni indicate nella tabella variano in proporzione della frequenza. Così per 42 periodi le tensioni indicate devono essere ridotte del 16 per cento.

TABELLA N. 15 — **Volt per spira e per cmq. di sezione di nucleo di ferro e con corrente a 50 periodi.**

(Tolta dal libro Ing. Nobili — Strumenti di misura)

B*eff*	B*max*	Volt per cmq.	B*eff*	B*max*	Volt per cmq.
1000	1414	0,00314	8000	11312	0,02513
2000	2828	0,00628	9000	12726	0,02827
3000	4242	0,00942	10000	14140	0,03142
4000	5656	0,01257	11000	15554	0,03456
5000	7070	0,01571	12000	16968	0,03770
6000	8484	0,01885	13000	18382	0,04084
7000	9898	0,02199	14000	19786	0,04398
			15000	21210	0,04713

ESEMPI. — 1.° Il nucleo magnetico di un trasformatore monofase ha la sezione netta di 400 cmq. Il trasformatore è per 3000 volt primari, colla frequenza di 50 periodi. Le spire primarie sono 300. Si domanda il valore del flusso massimo.

R. — Trascurando la caduta di tensione per resistenza ohmica allora si può applicare la formola (1):

$$E = 4{,}44 \times \Phi_m \times 300 \times 50 \times 10^{-8} = 3000 \text{ volt}$$

da cui si ricava:

$$\Phi_m = 4.500.000$$

Ma si può anche servirsi della tabella osservando che ogni spira del primario dà 10 V; quindi per ogni cmq. di sezione del nucleo corrisponde in ogni spira 10 : 400 = 0,025 volt. Ora a questo valore corrisponde circa 8000 linee per cmq. Perciò il flusso efficace totale è: $8000 \times 400 = 3.200.000$ ed il flusso massimo $\sqrt{2}$ il flusso efficace ossia 4.500.000.

84. Bobine di autoinduzione o di reattanza. — Nella pratica elettrotecnica delle correnti alternate occorre talvolta di dover costruire delle *resistenze induttive* o bobine di reattanza, invece di adoperare delle *resistenze ohmiche* allo scopo

di creare corrente in ritardo di fase o di creare delle cadute di tensione. Queste bobine vengono costruite in due modi:

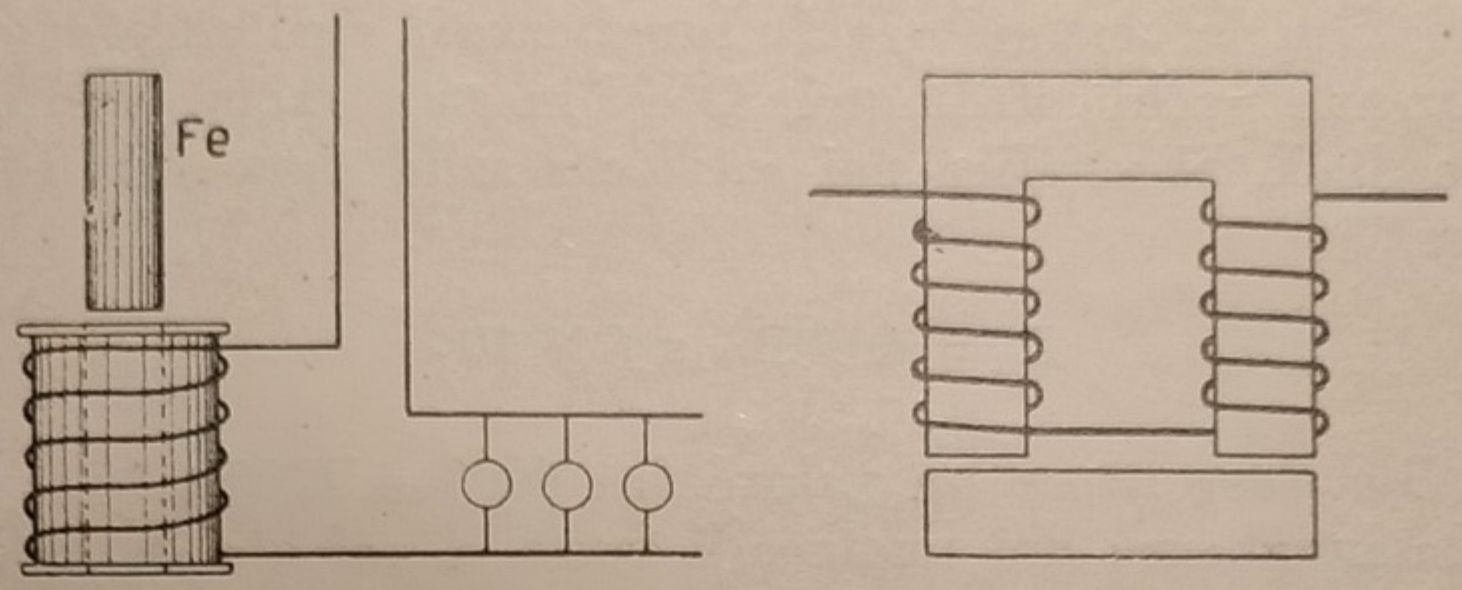


Fig. 138 - Bobine di *a.i* o di reattanza con nuclei di ferro lamellare.

1. con rocchetti di filo di sufficiente sezione per portare determinate intensità. Nel cavo del rocchetto si può far entrare a piacimento un nucleo di ferro lamellare o un mazzo di fili; con ciò si può far variare la reattanza del circuito;

2. con nuclei di ferro lamellari formanti talvolta un circuito magnetico, semichiuso, con degli interferri regolabili. Sui nuclei vi è l'avvolgimento di filo. I due sistemi sono rappresentati dalla fig. 138.

Come abbiam detto queste resistenze induttive non consumano quantità apprezzabili di energia ma sfasano la corrente.

Generalmente è data la tensione Es che si tratta di creare nel circuito, l'intensità I, la frequenza f e si tratta di calcolare la sezione s del nucleo, lo spessore o lunghezza l dell'interferro, ed il numero delle spire N da avvolgere. Quando si tratta di nuclei con interferri la calcolazione delle spire si fa tralasciando la riluttanza del nucleo e limitandosi solo a quella dell'interferro. Se si tratta di nuclei senza interferro (tipo trasformatori) si ricorre più facilmente alle tabelle dei paragrafi precedenti, N. 15, e di quella N. 16 che si trova più avanti.

Le soluzioni che si possono dare sono infinite e si sceglie per tentativi quella che offre minor peso, minor costo o minori perdite di energia per effetto Joule e isteresi nei nuclei.

Dalla formola $E_s = 2 \pi f L I$ si cava il valore di L. Questo valore lo si sostituisce nella formola data al paragrafo 72:

$$L = \frac{4\ \pi\ N^2}{10^9\ Ri} \text{ dove } Ri = \frac{l}{\mu s} \text{ mettendo } \mu = 1.$$

Si fissa la sezione s e la lunghezza l dell'interferro (generalmente pochi millimetri) (s e l in cmq. e cm.) e si cava il valore di N. Si verifica poi se N e s soddisfano alla formola parag. 83:

$$E = 4.44\ B_m\ s\ f\ N\ 10^{-8} \qquad (1)$$

dove Bm deve avere un valore fra 6000 e 12000.

La lunghezza del nucleo di ferro si calcola in modo da poter comprendere l'avvolgimento. La sezione del filo si calcola in base a 2-3 Amp. per mmq.

Per *bobine di reattanza* a nuclei magnetici chiusi completamente si può ricorrere alla tabella N. 16 ricavata dal libro dell'Ing. Nobili sugli strumenti di misura.

TAB. N. 16 — **Caratteristiche magnetiche di alcuni tipi di ferro dolce in lamierini di mm. 0,5 rilevate con corrente alternata a 50 periodi.**

(Dal libro dell'Ing. Nobili sugli strumenti di misura).

Induzione *Beff*	Ferro dolce comune in lamine non incartate		Ferro dolce Lohys isolato con carta		Ferro silicio Stalloy isolato con carta	
	Amp-Spire per cm.	*Heff*	Amp-Spire per cm.	*Heff*	Amp-Spire per cm.	*Heff*
1000	0.91	1.14	0.78	0.98	0.28	0.35
2000	1.22	1.53	1.13	1.42	0.45	0.56
3000	1.60	2.01	1.57	1.97	0.71	0.89
4000	2.00	2.51	2.08	2.61	1.10	1.38
5000	2.44	3.03	2.62	3.29	1.62	2.04
6000	2.91	3.65	3.20	4.02	2.22	2.68
7000	3.41	4.28	3.94	4.95	2.92	3.68
8000	4.13	5.20	4.88	6.15	3.88	4.87
9000	5.50	6.90	6.27	7.8	5.18	6.42
10000	7.00	8.80	8.00	10	7.51	9.55
11000	9.3	11.7	10.33	13	10.82	13.6
12000	12.6	15.8	14.00	17.0	16	20
13000	20	25.1	19.80	23.9	30	37.8
14000	38	48	28.00	35	65	82
15000	65	82	60	75	125	157
16000	125	157	125	157	—	—

Questa tabella dà gli amp-spire necessari per fare lo avvolgimento; per il suo uso bisogna fissare ad arbitrio la densità B delle linee di forza. Conoscendosi gli amp-spire e fissata l'intensità si cava il numero delle spire. Colla formola (1) si deduce la sezione del nucleo.

I valori di *Heff* sono dedotti moltiplicando le amp-spire per

$$\frac{4\ \pi}{10} = 1.256$$

La permeabilità con corrente alternata è data da:

$$\mu = \frac{Beff}{Heff}$$

dove *Beff* e *Heff* rappresentano i valori medi efficaci ossia i valori massimi divisi per 1,41.

La tabella serve a calcolare le ampère-spire di avvolgimenti per bobine di reattanza con circuiti magnetici di ferro lamellare completamente chiusi.

Se nel circuito magnetico vi è un interferro ogni centimetro d'aria sarà calcolato come tanti centimetri di ferro quanti ne indica il rapporto di permeabilità. Cioè bisogna aggiungere tanti amp-spire per centimetro d'aria quanto il rapporto μ.

Per applicare la tabella si ricorre alla formola (1) del paragr. 83, si cava il valore del flusso massimo che diviso per 1,41 dà il flusso efficace. Quindi si fissa l'induzione Beff e si trova la sezione del nucleo. Nella tabella si trovano le amp-spire e se si debbono mettere interferri si tien conto delle osservazioni qui sopra.

ESERCIZIO di calcolazione. — Calcolare una bobina di reattanza a nucleo lamellare di ferro della lunghezza sviluppata di 40 cm. capace di assorbire 100 volt con 10 amp. alla frequenza di 50 periodi. — Induzione B efficace uguale a 7000. Interferro di regolazione di 2 mm. (0,2 cm.). Trovare la sezione del nucleo, le spire e la sezione del filo.

R. Dalla tabella si rileva che per avere 7000 linee per cmq. nel ferro lamellare comune, a circuito magnetico chiuso occorrono 3,41 amp-spire per ogni cm. di lunghezza sviluppata dal nucleo. Causa l'interferro di 2 mm. bisogna aggiungere alla reale lunghezza del nucleo fissata in 40 cm. una lunghezza fittizia pari all'interferro (0,2) cm.) moltiplicata per la permeabilità.

La permeabilità risulta dalla tabella:

$$\mu = \frac{Beff}{Heff} = \frac{7000}{4,28} = 1635$$

Quindi occorre di aggiungere una lunghezza fittizia di $1635 \times 0,2 = 327$

cm. La lunghezza totale risulta di 327 + 40 = 367 cm. Per questo occorre un numero totale di amp-spire di:

$$367 \times 3{,}41 = 1251$$

ed essendo 10 amp. occorreranno 125 spire.

Applicando la formola al parag. 83 e tenendo conto che il flusso massimo è uguale a 1,41, il flusso medio efficace e che il flusso è il prodotto della sezione per l'induzione B si ha:

$$E = 4.44 \cdot f \, \Phi_m \cdot N \cdot 10^{-8} \qquad \Phi_m = s \, B_m$$

$$B_m = 7000 \times 1{,}41 = 9898$$

$$100 = 4.44 \times 50 \times s \times 9898 \times 125 \times 10^{-8}$$

$$s = \frac{100}{2.74} = 36{,}5 \text{ cmq.}$$

La sezione del filo si può calcolare in ragione di 2 amp. circa per mmq. Quindi per 10 amp. si può adoperare filo da 2,7 mm. di diametro che ha appunto 5 mmq. di sezione.

85. Effetto della capacità nei circuiti a corrente alternata. — Ricordiamo che la proprietà principale dei condensatori è la seguente: se si applica alle armature la tensione di un generatore qualsiasi (pila, macchina elettrostatica, dinamo a c. c.) si forma un passaggio istantaneo di corrente ossia le armature assorbono una certa quantità di corrente che si dice di *spostamento*; viceversa se si interrompe la tensione applicata alle armature queste restituiscono una corrente istantanea al circuito.

La intensità media della corrente istantanea è proporzionale alla f. e. m. applicata e alla *capacità*.

Fig. 139 - Immagine di un condensatore.

I condensatori inseriti in un conduttore sono paragonabili a un tubo d'acqua in cui è frapposto un diaframma impermeabile e molto elastico. (Fig. 139). Se al tubo si applica

una pressione alternativa ad onta del diaframma, si forma una corrente d'acqua alternativa. Pertanto *un condensatore lascia passare apparentemente la corrente alternata e non la corrente continua* e di questa proprietà si fa una larghissima applicazione nella telefonia per separare da un circuito le due specie di correnti. Un condensatore in serie sopra un circuito ha generalmente una resistenza ohmica altissima rappresentata dall'isolante interposto fra le armature. Ma se, come si è detto, lascia (apparentemente) passare la corrente ciò vuol dire che i condensatori rappresentano una diminuzione di resistenza ohmica.

Se Q è il numero di Coulomb assorbiti, E la f. e. m. in volt applicata alle armature il rapporto:

$$C = \frac{Q}{E}$$

si dice la *capacità* del condensatore considerato espressa in *Farad*.

Ciò premesso consideriamo il caso, frequentissimo nella pratica elettrotecnica di un condensatore fra due fili aventi una differenza di potenziale alternativa sinusoidale. (Fig. 140).

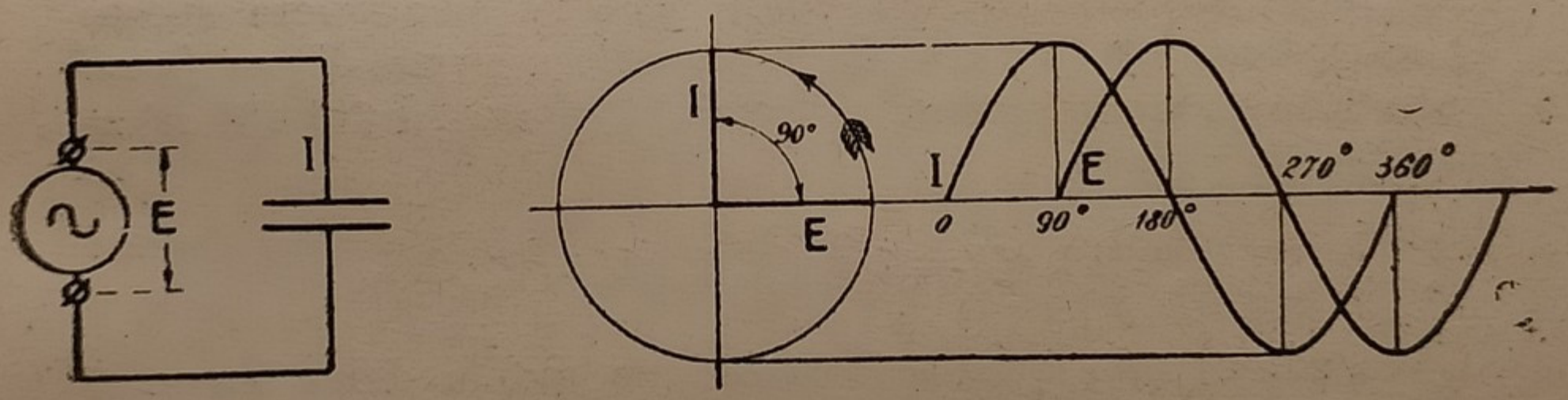


Fig. 140 . Diagramma vettoriale della tensione e corrente in un condensatore.

Al variare periodico della tensione E applicata si formerà nel circuito una corrente di carica e scarica. *Tale corrente alternativa riesce di un quarto di periodo* (90°) *in anticipo rispetto alla sinusoide od al vettore della f. e. m.*; si ha cioè un effetto opposto di quello ritrovato nei circuiti induttivi nei quali l'auto induzione fa ritardare di 90° il periodo della corrente rispetto alla f. e. m.

Osserviamo che in ogni *semi periodo* la tensione alle armature del condensatore varia da + E massimo a — E massimo cioè varia di 2 E max. In questo tempo rappresentato da 1/2 T si avrà avuto una carica nel condensatore espressa dalla *intensità media* per la durata di un semiperiodo. Essendo C la capacità avremo quindi:

$$C = \frac{{}^1/_2 \; T \; I}{2 \; E \text{ maximo}}$$

Tenendo conto: 1. che il valore del tempo T di un periodo in minuti secondi equivale a $\frac{1}{f}$ dove f è la frequenza della corrente; 2. che il valore E max è uguale a $\sqrt{2}$ il valore efficace; 3. che il valore medio di una corrente è $\frac{2}{\pi}\sqrt{2}$ il valore efficace I *eff* si ottiene:

$$I \; eff = 2 \; \pi \; f \; C \; E \; eff$$

Questa formola importante serve a calcolare, conoscendosi la capacità e la tensione, la *corrente efficace di carica* di un condensatore. E *eff* rappresenta la tensione efficace.

Come unità di misura della capacità si adopera spesso il *microfarad* (μ F) cioè la milionesima parte di un *farad* quindi la formola ultima, adottando questa unità di misura, diventa:

$$I \; eff = 2 \; \pi \; f \; C \; E \; eff \; 10^{-6}$$

Confrontando questa formola con quella della legge di Ohm espressa da:

$$I = \frac{E}{R}$$

si può scrivere:

$$R = \frac{I}{2 \; \pi \; f \; C \; 10^{-6}}$$

che rappresenta la resistenza fittizia del condensatore. Si dice *reattanza di capacità o capacitanza.*

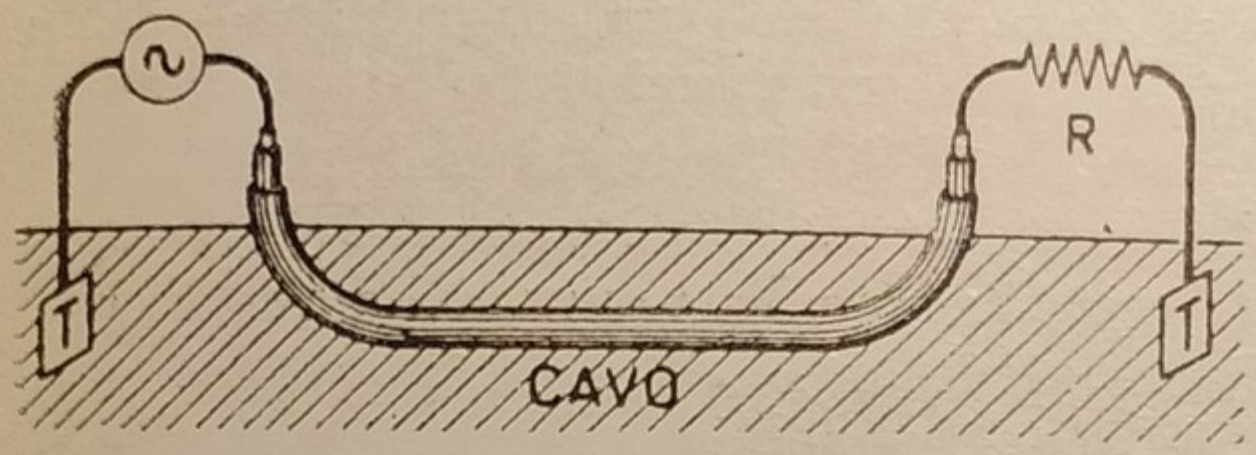
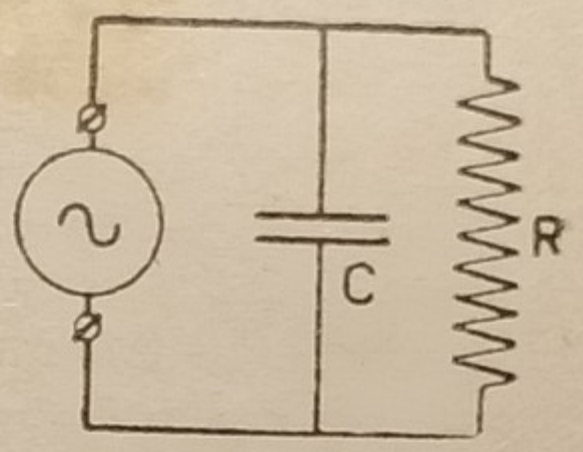


Fig. 141 - Un cavo unipolare sotterraneo rappresenta un condensatore in derivazione rispetto a una resistenza ohmica.



Schema del circuito.
Fig. 142

Casi diversi. — Consideriamo un condensatore formato dai due conduttori di una linea aerea molto lunga o da quello di un cavo sotterraneo con ritorno per la terra. (Fig. 141).

Supponiamo che la linea sia allacciata all'origine ad un generatore di corrente alternata e all'altra estremità a una resistenza R formata da stufe, lampade, forni elettrici. Una tale linea si comporta come un condensatore in parallelo con una resistenza ohmica. (Fig. 142).

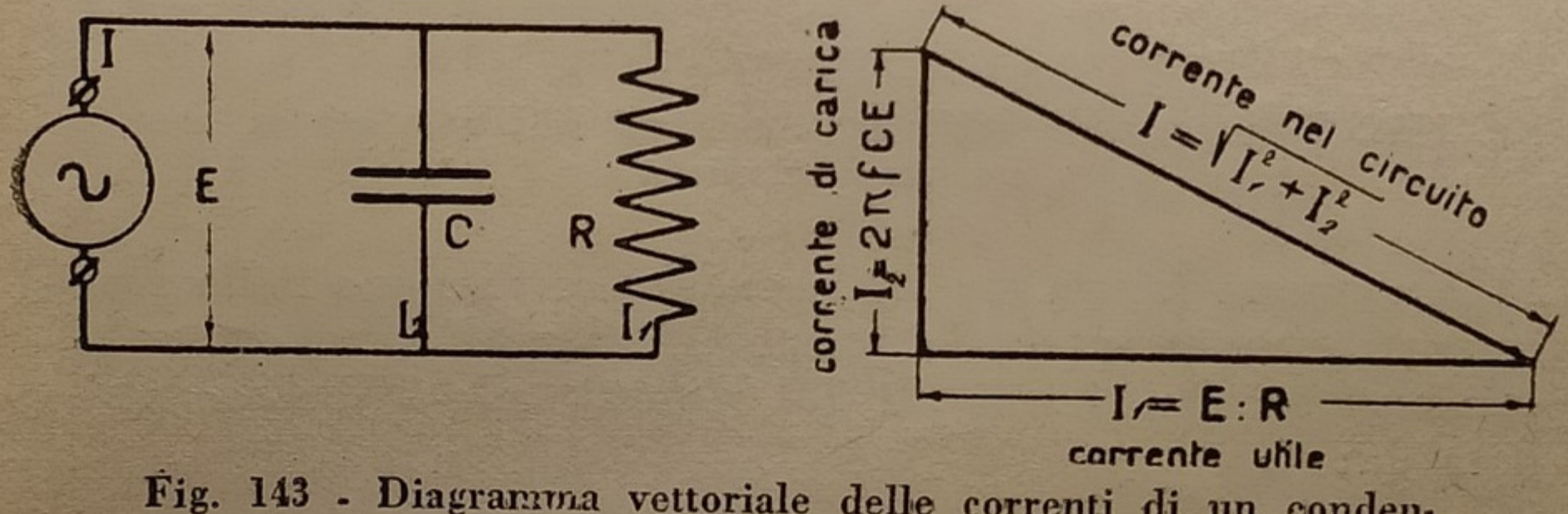


Fig. 143 - Diagramma vettoriale delle correnti di un condensatore e di una resistenza in parallelo.

La corrente all'origine della derivazione sarà la risultante di una corrente in fase colla f. e. m. corrispondente alla resistenza R e di una corrente in anticipo di un quarto di periodo data dal condensatore formato dalla linea. Per determinare questa corrente risultante possiamo ricorrere al sistema del triangolo in cui i due cateti ad angolo retto sono in lunghezza proporzionali alle rispettive intensità (Fig. 143); ossia l'uno a: $\frac{E}{R}$ e l'altro a: $2\,\pi\,E\,C\,f$.

La corrente risultante I (ossia l'ipotenusa) riesce in anticipo di un angolo φ rispetto alla f. e. m. E. Tale spo-

sbamento in anticipo si dice *positivo* per distinguerlo da quello in ritardo provocato dalla selfinduzione.

Anche in questo caso se I è l'intensità del circuito, I cos φ rappresenta la componente attiva perchè è in fase con E, mentre I sen φ rappresenta la componente reattiva o corrente di carica del condensatore.

Quando in un circuito si trovano in serie una resistenza ohmica R ed un condensatore, allora la d. d. p. risultante sarà la somma vettoriale della caduta di tensione RI in fase colla corrente e della f. e. m. ai morsetti delle armature del condensatore in ritardo di 90° rispetto alla intensità. Il diagramma è rappresentato dalla fig. 144.

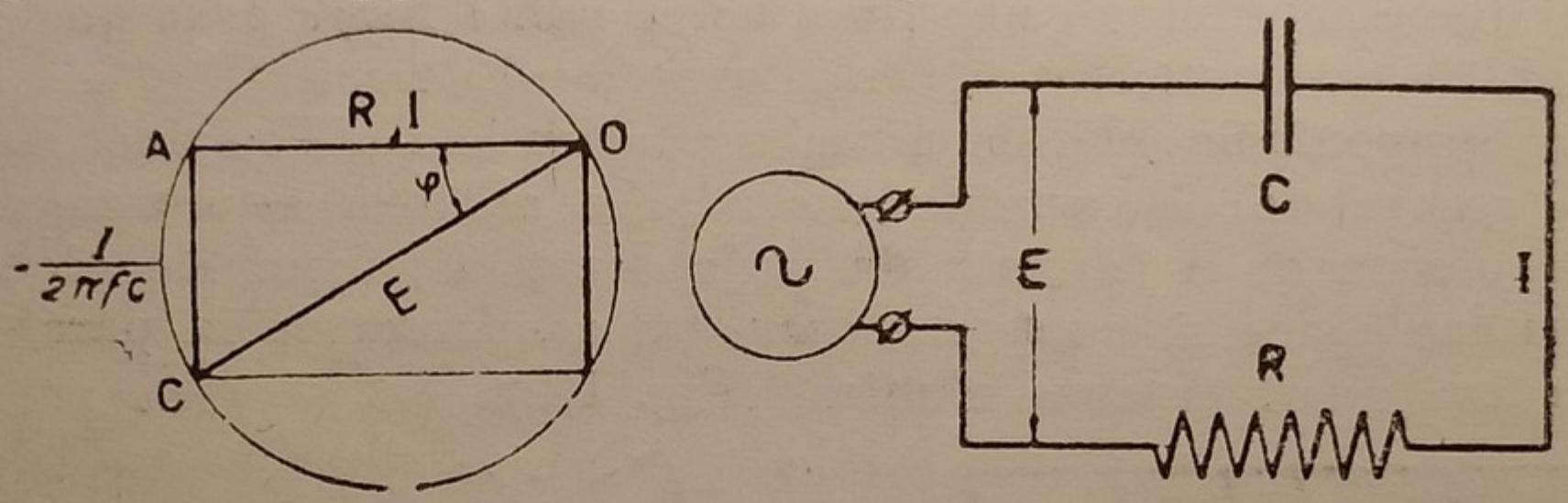


Fig. 144 . Diagramma vettoriale delle tensioni di una resistenza in serie con un condensatore.

In questa figura sia RI la caduta di tensione nella resistenza R rappresentata dal cateto OA. Sia AC la tensione del condensatore in ritardo di 90° rispetto alla RI. Essa sarà data da:

$$I : 2 \pi f C$$

dove f è la frequenza e C la capacità in Farad.

L'ipotenusa OC rappresenterà in lunghezza e coll'angolo di fase φ la f. e. m. risultante agli estremi del circuito considerato.

L'impedenza del circuito è data in ohm:

$$Z = \sqrt{R^2 \times \left(\frac{1}{2 \pi f C}\right)^2}$$

In questo calcolo si trascura la resistenza ohmica interna del dielettrico del condensatore che si ritiene infinita.

86. Circuiti con resistenze, capacità e reattanze in serie. — Quando in un circuito si trovano in serie una resistenza di R ohm, una selfinduzione di induttanza L Henry, un condensatore di C farad di capacità, allora, facendo il diagramma vettoriale, delle singole f. e. m. oppure delle singole reattanze si può trovare la f. e. m. totale oppure l'impedenza.

La fig. 145 dà lo schema del circuito ed il diagramma vettoriale delle resistenze il quale si riduce al solito triangolo:

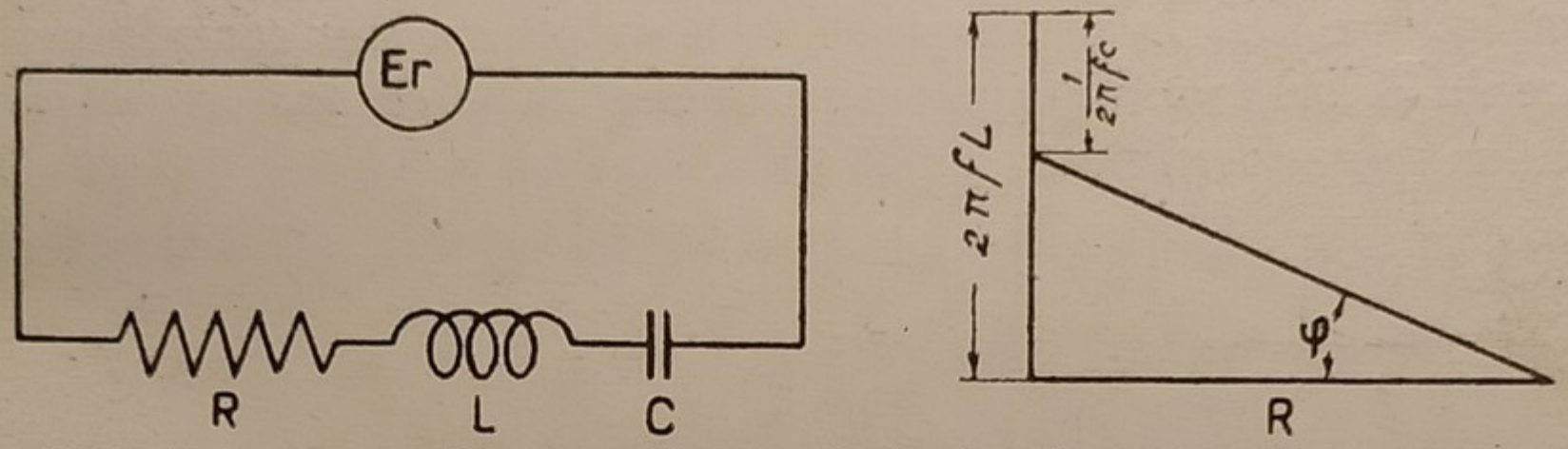


Fig. 145 - Diagramma di una resistenza induttiva in serie con una capacità.

Un cateto è formato da una lunghezza proporzionale a R; il secondo cateto è formato dalla differenza fra la reattanza di self e quella di capacità ossia dal valore:

$$2\,\pi\,f\,L - \frac{1}{2\,\pi\,f\,C}$$

L'impedenza complessiva è data dalla ipotenusa ossia dal valore:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(2\,\pi\,f\,L - \frac{1}{2\,\pi\,f\,C}\right)^2} \qquad (1)$$

Lo spostamento angolare φ della corrente rispetto alla intensità sarà in anticipo od in ritardo a secondo della prevalenza della capacità o della self.

87. Circuiti con resistenza induttiva e capacità in parallelo. — Il caso è rappresentato dalle figure 146 e 147 in cui C è un condensatore in parallelo con una resistenza induttiva R e L. La tensione comune alle due derivazioni è E, le intensità nelle due derivazioni sono indicate con Ic e Is, mentre con Ir è indicata la corrente risultante.

Per fare il diagramma vettoriale delle intensità fissiamo la verticale OE del vettore della tensione e da O tiriamo il vettore OA in ritardo di fase φ rappresentante la corrente Is. La corrente nell'altra derivazione Ic sarà data dal segmento OB in anticipo di fase di 90° rispetto alla OE. Componendo la OA e la OB si ottiene la OC che rappresenta in lunghezza e direzione il vettore della corrente Ir.

A seconda delle lunghezze e posizioni delle due componenti OA e OB la risultante Ir può riuscire più grande o più piccola delle componenti; può anche riuscire ora in anticipo ora in ritardo rispetto ad E.

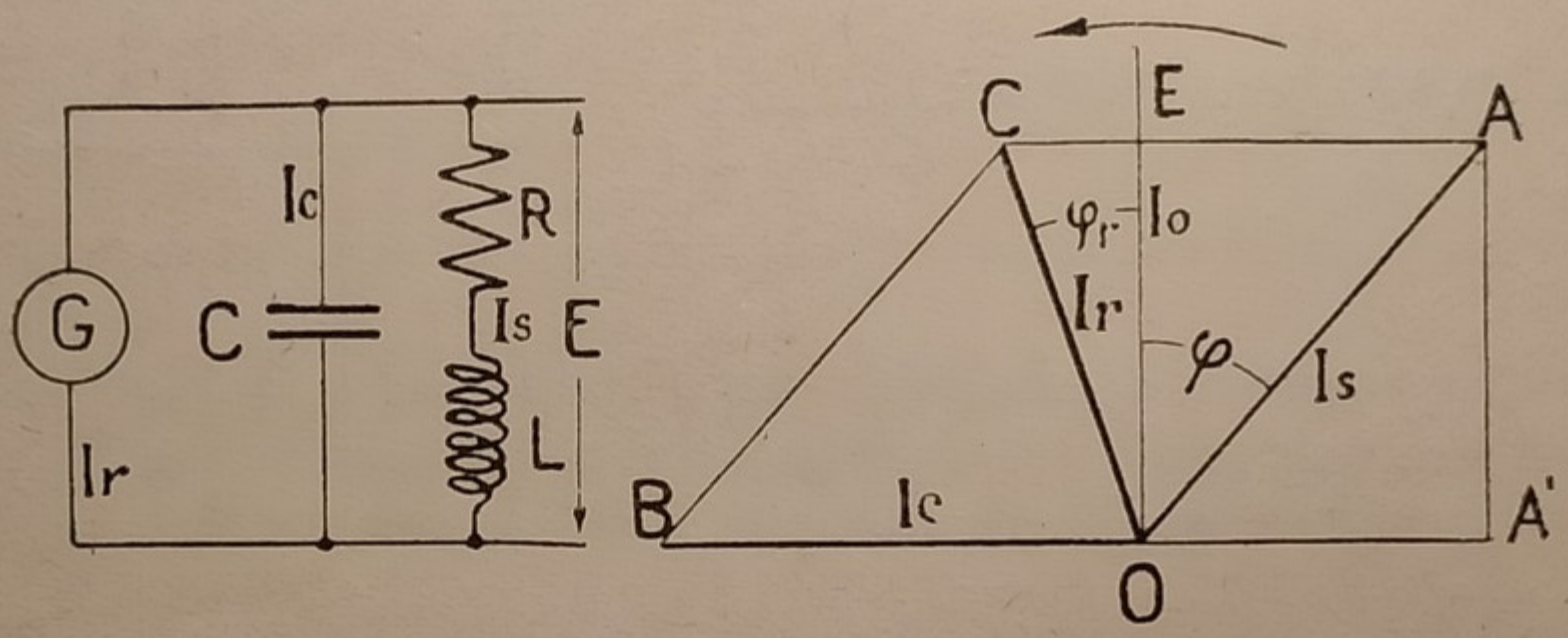


Fig. 146-147 - Diagramma di una capacità e resistenza induttiva in parallelo fra loro.

Analogo diagramma si può costruire considerando le *conduttanze* (inverse delle resistenze) rappresentate:

per la resistenza R da $\frac{1}{R}$

per la capacità C da $2 \pi f C$

per la self L da $\frac{1}{2 \pi f L}$

In base a tutte queste proprietà dei circuiti induttivi e di capacità si sono fatte applicazioni importanti nella telegrafia ordinaria, nella telefonia, negli impianti di trasmissione di energia. La radiotelegrafia e la radiotelefonia è tutta basata sopra combinazioni di self e di capacità. Per impedire la formazione delle scintille e sovratensioni dovute ad effetti di selfinduzione nella apertura dei circuiti, si mettono in deri-

vazione dei condensatori. Nella telefonia con cavi sotterranei oppure con lunghe linee aeree, si corregge l'effetto nocivo della forte capacità, inserendo delle bobine di selfinduzione (dette di Pupin) altrimenti la trasmissione delle correnti alternate a frequenza piuttosto alta data dai suoni e dalle parole sarebbe estremamente indebolita. Negli impianti di energia elettrica per scopi industriali le bobine di self sono impiegate per impedire il transito verso le macchine alle correnti oscillatorie di origine atmosferica; sono impiegate per regolare la tensione; per ovviare gli effetti disastrosi dei corti circuiti. Si adoperano infine i condensatori per compensare la selfinduzione dovute agli impianti dei motori e correggere l'angolo di fase fra l'intensità e la f. e. m.

Nelle applicazioni pratiche industriali la reattanza e la capacità si esprimono più volentieri in chilovoltampère perchè così si dà l'idea della loro grandezza e dimensione. Infatti l'indicazione in « henry » e in microfarad, pur essendo indispensabili nei calcoli, non da l'idea delle dimensioni o proporzioni e dell'effetto nello stesso modo che non si potrebbe avere idea di proporzioni se si dicesse che un alternatore è di 100 Amp. oppure di 1000 volt. I voltampère sono espressi:

per le reattanze monofasi $E\ I = 2\ \pi\ f\ L\ I^2$

per le capacità monofasi $E\ I = 2\ \pi\ f\ C\ E^2$

dove C è espresso in « Farad » e L in « Henry ».

ESEMPI. — 1.° Una linea di trasmissione formata da 2 fili di 1 cm. posti alla distanza di 100 cm., ha la lunghezza di 150 Km. ed una capacità di 0,0052 microfarad per Km. Si domanda qual'è la corrente di carica se alla origine della linea si applica una f. e. m. alternativa di 70 mila volts a 42 periodi e supposto aperto il circuito all'estremità e zero la resistenza ohmica?

R. — Applichiamo la formola che dà l'intensità di carica dei condensatori:

$$I = 2\pi f C\ E\ 10^{-6} = 2\pi \times 42 \times 0.0052 \times 150 \times 70000 \times 10^{-6} = 14{,}42 \text{ amp}$$

L'energia apparente è $14{,}42 \times 7000 = 100940$ volt-ampère.

2.° Un circuito è composto di una resistenza di 10 ohm e una capacità di 2 microfarad. Alle estremità viene applicata una f. e. m. alternativa a 50 periodi e 2000 V. Quale sarà l'intensità della corrente?

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\,\pi\,f\,C}\right)^2}} = \frac{2000}{\sqrt{10^2 + \left(\frac{1}{2\,\pi\,50 \times 2 \times 10^{-6}}\right)^2}} = 1{,}25 \text{ Amp.}$$

3.° Determinare la capacità in microfarad per chilometro di un cavo sotterraneo lungo 10 Km. il quale con una tensione alternativa di 6000 V a 50 periodi assorbe 3,77 amp.

$$I = \pi\,f\,C\,E\,10^{-6} = 3{,}77 = 2 \times \pi \times 50 \times C \times 6000 \times 10^{-6}$$

da cui si cava C = 2 microfarad sui 10 chilometri ossia 0.2 microfarad per Km.

4.° Determinare l'induttanza L di una selfinduzione per compensare in serie una capacità di 1 microfarad e per una corrente a 50 periodi.

R. — L'impedenza di un circuito formato da una selfinduzione e da una capacità in serie, se si trascura la resistenza ohmica, è espressa dalle formole:

$$2\,\pi\,f\,L - \frac{1}{2\,\pi\,f\,C\,10^{-6}}$$

Per la compensazione è necessario che i due termini siano uguali. Ossia:

$$2\,\pi\,f\,L = \frac{1}{2\,\pi\,f\,C\,10^{-6}} \text{ da cui } L = \frac{1}{4\,\pi^2\,f^2\,C\,10^{-6}} = \frac{1}{314^2 \times 10^{-6}} = 10 \text{ Henry}$$

PROBLEMI DA RISOLVERE.

1.° In derivazione tra due fili fra i quali vi è una differenza di potenziale di 500 Volt vengono inseriti dei condensatori di 50 microfarad di capacità. La frequenza è di 50 periodi. Quale corrente assorbono i condensatori?

2.° Quale tensione si dovrà applicare alle armature di un condensatore di 10 microfarad perchè si abbia una corrente di 5 amp. quando la frequenza è di 42 periodi?

3.° Un circuito induttivo il quale ha una resistenza ohmica di 1 ohm ed un coefficiente di autoinduzione L = 0,02 Henry, si trova in serie con un condensatore di 10 microfarad. Alle estremità del detto circuito composto della resistenza induttiva e del condensatore si applica una

tensione alternativa di 500 V. con 50 periodi. Trovare l'intensità della corrente e le tensioni ai capi del circuito induttivo e del condensatore.

4.° In uno stabilimento vi è un gruppo di motori a c. a. alla tensione di 300 V. con 50 periodi e che assorbe complessivamente 40 Ampère con un fattore di potenza cos $\pi = 0{,}6$. Si domanda quale capacità dovrebbero avere dei condensatori che messi in parallelo coi motori avrebbero lo scopo di elevare il fattore di potenza a cos $\pi = 0{,}8$.

5.° Un wattmetro inserito sopra un cavo sotterraneo (conduttore) con una tensione di 2000 V. e 50 periodi segna 500 watt di potenza consumata. Si domanda la intensità della corrente attiva, della corrente di carica del condensatore, quella totale e lo sfasamento, supposto che la capacità del cavo sia di 5 microfarad.

6.° In un circuito vengono inserite in parallelo una resistenza induttiva di 10 ohm e 0,1 Henry ed un condensatore della capacità di 5 μ F (microfarad). Alla estremità del circuito si applicano 100 volt con 50 periodi. Si domanda: 1. la reattanza; 2. la capacitanza; 3. l'impedenza; 4. la corrente nei due rami in parallelo; 5. la corrente totale.

88. Fenomeni di risonanza. — Quando nel circuito esterno ad un generatore a corrente alternata si trovano in serie una resistenza, una selfinduzione ed una capacità e le condizioni sono tali che la reattanza $2\,\pi\,f\,L$ è uguale alla capacitanza (reattanza di capacità) $1 : 2\,\pi\,f\,C$ allora risulta dalla formola (1) del paragrafo 86 che il valore tra parentesi sotto il radicale diventa zero e $Z = R$.

In queste condizioni il circuito rispetto alle estremità del generatore si comporta come se non vi fosse nè self, nè capacità e si avrebbe che $I = E : R$.

Si dice allora che vi è *risonanza* fra capacità e self. Dalla uguaglianza sopra detta si ha:

$$2\,\pi\,f\,L = \frac{1}{2\,\pi\,f\,C} \qquad (2)$$

da cui si cavano le seguenti formole:

$$C = \frac{1}{(2\,\pi\,f)^2\,L} \text{ oppure } L = \frac{1}{(2\,\pi\,f)^2\,C} \text{ oppure } f = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{C\,L}}$$

che servono a calcolare il valore di C in Farad o di L in

Henry e della frequenza f necessari per avere la risonanza in funzione degli altri valori.

Moltiplicando per I l'eguaglianza (2) si ha:

$$2 \pi f L I = \frac{I}{2 \pi f C}$$

Ma i due termini rappresentano le tensioni ai morsetti rispettivamente della self e della capacità. Ossia la f. e. m. di selfinduzione è uguale a quella della capacità ed è indipendente dalla tensione applicata alle estremità del circuito.

Da ciò si deduce che quando vi è risonanza in un circuito, ai morsetti del generatore può esistere una f. e. m. E minore, e talvolta assai minore di quella esistente ai morsetti della self o della capacità. Per esempio supponiamo di avere un circuito monofase alimentato da un generatore a 20.000 volt avente una resistenza di 10 ohm e in serie una self con una reattanza ($2 \pi fL$) di 1000 ohm e un condensatore con una reattanza di capacità $\left(\frac{1}{2 \pi f C}\right)$ pure di 1000 ohm. Se nel circuito esistesse la sola self o la sola capacità:

$$Z = \sqrt{10^2 + 1000^2} = 1000 \text{ ohm}$$

e l'intensità sarebbe $I = 20000 : 1000 = 20$ A.

Se invece vi sono l'una e l'altra di pari reattanza allora essendo $Z = R = 10$ ohm si avrebbe:

$$I = 20000 : 10 = 2000 \text{ A}$$

ed ai morsetti della self o della capacità una f. e. m. di

$$Z\ I = 2000 \times 1000 = 2000000 \text{ Volt}$$

Tale voltaggio avrebbe naturalmente effetti distruttivi. Il caso potrebbe presentarsi nell'esercizio delle linee aeree e cavi sotterranei ad alta tensione per trasmissione di energia a grandi distanze. Abbiamo spiegato che il circuito primario di un trasformatore specialmente quando il secondario è aperto (o viceversa) rappresenta una selfinduzione in

cui L è nell'ordine di qualche Henry fino a un centinaio di Henry. Sappiamo pure che i conduttori di cavi sotterranei e quelli delle linee aeree molto lunghe (oltre a un centinaio di chilometri) rappresentano le armature di condensatori di sensibile capacità sia fra loro che fra ciascuna e la terra. Onde può succedere che la capacità delle linee, per una certa frequenza, possa entrare in risuonanza con le self rappresentate dai circuiti dei trasformatori. Il caso succede talvolta quando all'estremità di linee di qualche centinaio almeno di chilometri vi è un trasformatore col secondario aperto. Si verificano allora fenomeni di sovratensione che si rendono visibili con scariche ai parafulmini di linea.

Generalmente però i valori di C e di L non sono tali da far entrare in risuonanza le linee colle frequenze industriali di 42 o 50 periodi; ma se le correnti o le tensioni prodotte contengono delle armoniche (parag. 75) di frequenza tripla o quintupla delle frequenze fondamentali allora si possono provocare sovratensioni per risonanza.

Le figure 148*a* - 148*b* rappresentano la prima il caso generale teorico; il secondo un caso pratico scelto fra i moltissimi che si possono presentare nell'esercizio delle linee di trasmisione a grande distanza. In esso vi è un generatore che alimenta un trasformatore elevatore di tensione trifase col primario a triangolo e secondario a stella. Al primario è interrotto uno dei collegamenti (3); il secondario della colonna corrispondente alla terza fase rappresenta una self la quale viene a trovarsi in serie colla capacità del filo 3 rispetto a 2 e I e col generatore di tensione rappresentato dall'avvolgimento delle colonne 1 e 2.

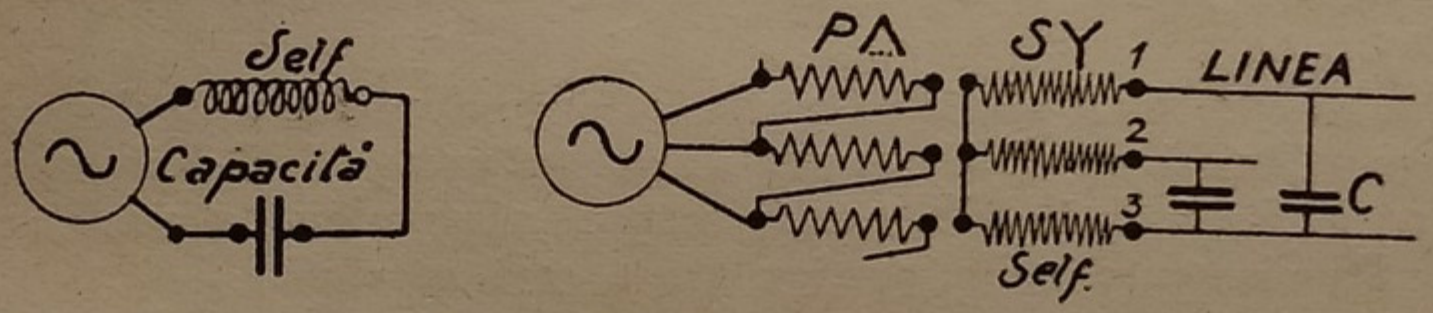


Fig. 148 - a) Caso generale per la risonanza — b) Caso speciale: trasformatore col primario a triangolo e con una fase interrotta.

La condizione principale perchè abbiano a prodursi effetti di risonanza nei circuiti industriali ad alta tensione è un'alta frequenza; ora questa può essere prodotta, oltre che dalle armoniche, anche da altre cause occasionali: fra cui la più frequente è data dagli archi voltaici verso terra, sugli

isolatori delle linee e negli avvolgimenti delle macchine ecc. Questi corti circuiti verso terra sono quelli che generano le forti correnti ad alta frequenza, risonanze e sovratensioni distruttive.

In generale gli archi voltaici che hanno in derivazione una capacità ed una self diventano generatori ad alta frequenza. Di questo fenomeno, detto arco Poulsen, si approfitta per creare le alte frequenze necessarie per la telegrafia senza fili, nella quale appunto si adoperano frequenze da 100.000 a 200.000 periodi al 1".

ESEMPIO. — Un cavo biconduttore è alimentato da un alternatore a 10000 volt. Il cavo ha una resistenza di ohm e una capacità = 2,5 microfarad. Il circuito dell'alternatore ha una induttanza L = 0,4 Henry. Si domanda quale sarà la frequenza dell'alternatore che può far entrare in risonanza il sistema e quale l'intensità e la sovratensione.

R. La frequenza di risonanza è data da:

$$f = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{L\,C}} = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{2{,}5 \times 10^{-6}\,0{,}4}} = 160 \text{ periodi}$$

In questo caso la corrente diventa:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{10000}{5} = 4000 \text{ ampère}$$

La tensione diventa:

$$E_s = 2\,\pi\,f\,L\,I = 2\,\pi\,.\,0{,}4\,.\,160\,.\,4000 = 1610000 \text{ volt}$$

Naturalmente tale tensione porta alla perforazione degli isolanti, formazione d'archi e abbruciamento del circuito dell'alternatore. Si osserva però che i dati dell'esempio non corrispondono a quelli che si hanno ordinariamente nella pratica salvo casi speciali.

89. Skineffect o effetto Thomson. — Un conduttore che trasmette della corrente si può immaginare come formato dall'aggregato di tanti conduttori paralleli ossia di tanti filetti di corrente. Ma noi abbiam visto che quando due fili sono vicini, paralleli e l'uno di essi viene percorso da una corrente variabile, nell'altro si sviluppa una f. e. m. indotta che avrà una direzione e un'ampiezza corrispondente alle

leggi generali dell'induzione elettromagnetica e specialmente alla legge di Lenz. Applicando questo caso di induzione si può prevedere che ciascun filetto, in cui si può suddividere la corrente in un conduttore percorso da c. a. indurrà negli altri una f. e. m. contraria alle variazioni di corrente in ragione della rispettiva distanza e siccome i filetti centrali sono più sottoposti alla induzione di quelli posti alla periferia ne avverrà in questi una f. e. m. più sentita e la corrente tenderà a passare meno verso il centro del conduttore ed a condensarsi di più verso la superficie. (Fig. 149).

Tale effetto si dice *skineffect* o effetto di pelle per la tendenza della corrente a passare superficialmente. Lo skineffect non ha quasi importanza apprezzabile negli ordi-

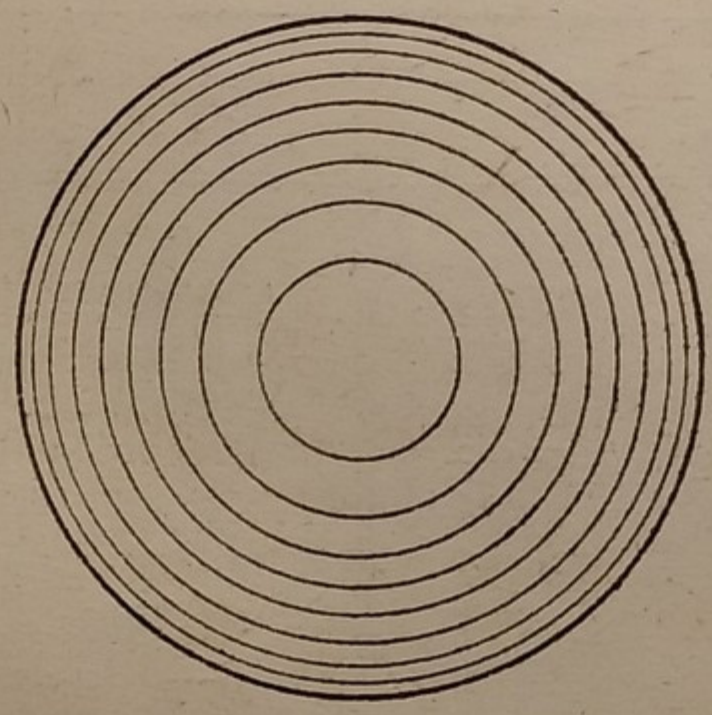


Fig. 149. - Skin-effect o condensazione della corrente alternata verso alla superficie dei conduttori.

nari conduttori a corrente alternata e colle solite frequenze industriali, ma diventa rilevante quanto più grande è la sezione dei conduttori e la densità e quanto più alta è la frequenza. Ancora più forte diventa l'effetto quando invece di conduttori di rame si adoperano conduttori di ferro e cioè di materiale magnetico.

Lo skin effect si risolve in una maggior resistenza al passaggio della corrente in confronto della resistenza ohmica effettiva del conduttore considerato, ossia della resistenza calcolata colle solite formole della corrente continua. L'aumento di resistenza diventa molto forte quando si tratta dei conduttori impiegati nella telegrafia senza fili in cui la frequenza impiegata è molto alta. In questi casi il passaggio

della corrente è limitato ad una scorza sottile del conduttore e per vincere l'enorme resistenza rappresentata dalle antenne o aerei di qualche decina di metri occorrono altissime tensioni.

Chiamando Ra la resistenza di un conduttore sottoposto a corrente alternata e Rc la resistenza dello stesso conduttore colla corrente continua calcolata colle solite formole o colla legge di Ohm e K il rapporto:

$$K = \frac{Ra}{Rc}$$

si è trovato che K aumenta in ragione del prodotto fd^2 dove f è la frequenza e d il diametro in cm. del conduttore supposto tondo. Pei conduttori cilindrici di rame si ha la seguente tabella:

fd^2	K	fd^2	K
0	1.0000	1620	1.8628
20	1.0000	2000	2.0430
80	1.0001	2420	2.2190
180	1.0150	2880	2.3937
320	1.0605	5120	3.0956
500	1.0747	8000	3.7940
820	1.3180	18000	5.5732
980	1.4920	32000	7.3250
1280	1.6778	—	—

ESEMPIO. — Trovare la resistenza effettiva di un conduttore per forno elettrico del diametro medio di 5 cm. percorso da corrente a 50 periodi.

Il valore di fd^2 sarà espresso da $50 \times 25 = 1250$. La resistenza effettiva si deve quindi calcolare, conforme alla tabella, di 1,68 circa la resistenza ohmica.

90. Potenza di un circuito a corrente alternata. — Abbiam visto che quando una corrente alternata alimenta una resistenza ohmica, il periodo della intensità è in concordanza di fase colla f. e. m. Allora il prodotto degli ampère pei volt dà la potenza in watt consumata dalla resistenza ohmica. Uguale risultato si avrà con tutti gli apparecchi utilizzatori dell'energia elettrica nei quali vi sia concordanza di fase fra intensità e f. e. m.

Ma allorchè il periodo della corrente è spostato di fase rispetto a quello della f. e. m. sia in anticipo (caso di presenza dei condensatori) sia in ritardo (per auto induzione) allora il loro prodotto non corrisponde ai watt.

Infatti consideriamo nella fig. 150 due sinusoidi, l'una rappresentante la intensità I, l'altra la f. e. m. E in fase fra loro.

Tracciamo una curva W la quale rappresenti istante per istante il prodotto di E per I. Questa curva rappresenta i watt e riesce completamente positiva cioè superiore alla linea del tempo.

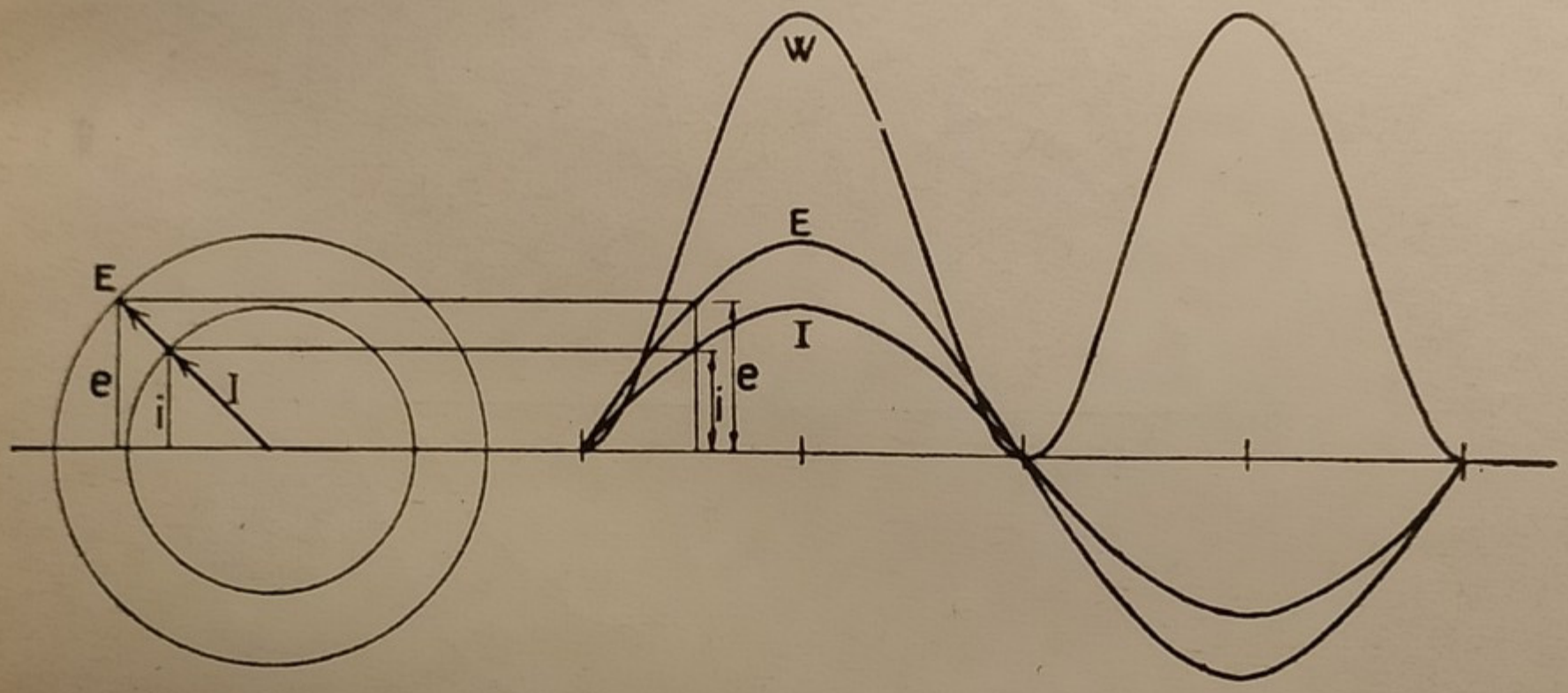


Fig. 150. - Curva dei watt nel caso che I ed E sono in fase.

Se invece consideriamo nella fig. 151 le sinusoidi di I e di E spostate fra loro e tracciamo la curva W che istante per istante rappresenta il prodotto E × I si osserva che la curva è in parte positiva ed in parte negativa.

Ciò significa che in ogni periodo l'energia in parte viene assorbita ed in parte ridata al circuito; questo si comporta ora come *generatore* ora come motore. Il caso è paragonabile all'albero di una motrice a vapore od a gaz ad un sol cilindro motore, munita di volano; il volano in questo caso assorbe una parte dell'energia della corsa accelerante dello stantuffo e la restituisce ai punti morti quando è lo stantuffo che si lascia trascinare.

Quando vi è spostamento di fase fra intensità e f. e. m. allora i watt reali consumati dal circuito sono formati dalla differenza fra il lavoro positivo ed il lavoro negativo; in

ogni caso *i watt reali sono minori del prodotto dei volt per gli ampère.* Cioè i watt reali sono uguali al prodotto dei volt per gli ampère, moltiplicati per un coefficiente minore di uno. Tale coefficiente di riduzione si dice *fattore di potenza.*

Al paragrafo 82 abbiamo visto che la corrente I di un circuito induttivo si può considerare come composta di due componenti: una attiva in fase colla f. e. m. e che ha per valore I cos φ ed una reattiva in ritardo di 90° che serve a produrre il campo magnetico.

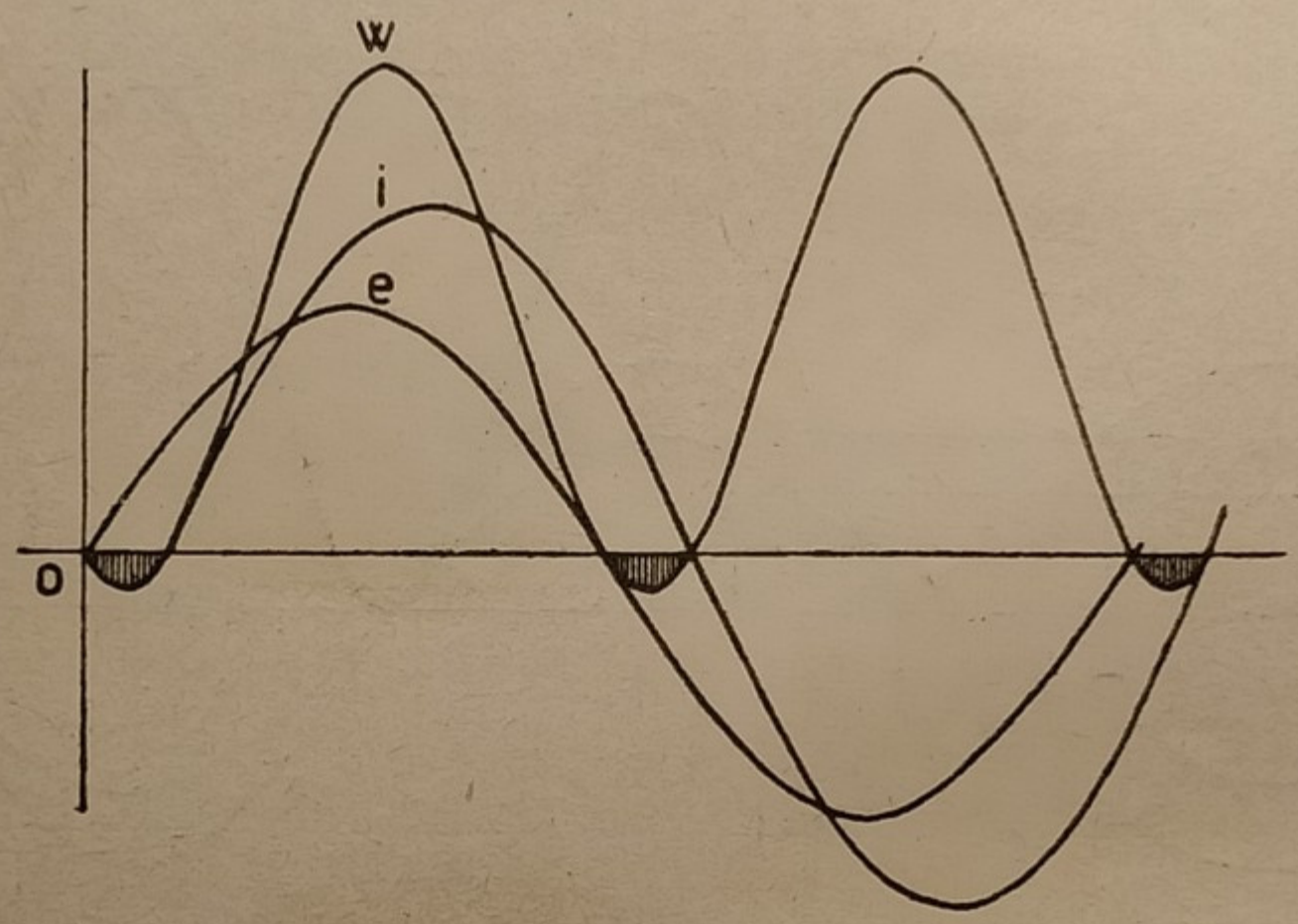


Fig. 151. - Curva dei watt nel caso che I è in ritardo di fase rispetto a E.

Perciò i watt W consumati o prodotti da un apparecchio o macchina elettrica, saranno dati dalla formola:

$$W = E \times I \cos \varphi$$

dove cos φ è il *fattore di potenza,* e rappresenta il coseno dell'angolo di spostamento di fase fra i vettori della f. e. m. e della intensità.

Ecco una tabella dei valori di cos φ e sen φ corrispondenti a diversi angoli:

Angoli	cos φ	sen φ	Angoli	cos φ	sen φ
0^0	1.00	0.010	50^0	0.643	0.766
5^0	0.996	0.087	53^0	0.600	0.800
10^0	0.985	0.174	55^0	0.574	0.819
15^0	0.966	0.259	60^0	0.500	0.866
20^0	0.940	0.342	65^0	0.423	0.906
25^0	0.906	0.423	70^0	0.342	0.940
30^0	0.866	0.500	75^0	0.259	0.966
35^0	0.819	0.574	80^0	0.174	0.985
37^0	0.798	0.600	85^0	0.087	0.996
40^0	0.766	0.643	90^0	0.000	1.000
45^0	0.707	0.707			

Dalla formola ultima si cava:

$$Cos\ \varphi = \frac{W}{E \times I}$$

Cioè il fattore di potenza è il rapporto fra i watt ed il prodotto dei volt per gli ampère.

Al posto di cos φ possiamo sostituire il valore di R : Z (paragrafo 81) oppure il rapporto Eo : Er (paragrafo 79) ecc. ed otterremo altre formole che possono essere utili in alcuni casi pratici.

Dato il valore cos φ si può rapidamente trovare l'angolo φ in questo modo:

Si descrive, centro in O., un cerchio con raggio di 100 mm. Sull'asse orizzontale passante per O si porta, a partire dal centro, una lunghezza in mm. pari a cos $\varphi \times 100$; si eleva la perpendicolare fino a incontrare in A il cerchio.

L'angolo del raggio OA coll'asse orizzontale è quello cercato; si misura con goniometro. Le ordinate del punto A in mm. rappresentano sen $\varphi \times 100$.

Quando si parla di energia della corrente alternata si deve fare la distinzione fra i *volt-ampère*, che rappresentano l'*energia apparente* e i *watt* che rappresentano l'*energia reale* e cioè quella veramente utilizzata o tradotta in calore.

Riferendoci al triangolo rettangolo delle f. e. m. esposto al parag. 79 possiamo dire:

La *potenza apparente Pa in volt-amp è composta dal*

vettore di potenza reale Pr e dal vettore di potenza reattiva Ps ad angolo retto fra loro. Perciò si ha:

$$P_a^2 = P_r^2 + P_s^2 \qquad P_r = P_a \cos \varphi \qquad P_s = P_a \operatorname{sen} \varphi$$

Si ha pure che $Pr = RI^2$ $Ps = 2 \pi fLI^2$ dove R è la resistenza ohmica del circuito e I l'intensità; f la frequenza e L l'induttanza.

Dato un sistema complesso di circuiti con resistenza, capacità e reattanze alimentate da una sola sorgente a c. a. stà questo principio:

La potenza apparente totale è la risultante geometrica (ipotenusa) della somma aritmetica delle potenze attive (1.° cateto) e della somma delle potenze reattive (2°. cateto).

Il fattore di potenza negli impianti industriali trifasi si può ritenere:

Resistenze puramente ohmiche (lampade a incandescenza): $\cos \varphi = 1$.

Motori buoni lavoranti a pieno carico: $\cos \varphi = 0{,}9$.

Motori buoni lavoranti da 1/2 a 3/4 di carico: $\cos \varphi = 0{,}8$.

Motori funzionanti a vuoto: $\cos \varphi = 0{,}2 - 0{,}3$.

Negli impianti di forza motrice di grandi stabilimenti il *cos* φ varia da 0,7 a 0,75 e scende a 0,5-0,6 quando le macchine operatrici mosse dai motori elettrici hanno un servizio intermittente e cioè lavorano a pieno carico per qualche minuto e poi funzionano a vuoto per altro periodo di tempo. La media del fattore di potenza degli impianti che utilizzano l'energia parte in luce e parte in forza è di 0,8.

Il fattore di potenza di un circuito monofase si rileva praticamente inserendo nel medesimo un voltmetro, un amperometro ed un wattmetro; dividendo la potenza in watt per il prodotto dei volt per gli ampère si ha il fattore di potenza. Con esso si calcola lo spostamento angolare in base a tabelle trigonometriche.

ESEMPIO. — Un apparecchio elettrico monofase (motore) consuma 12 Amp. con 120 V. ed inserendo un wattmetro esso segna 926 watt. Si domanda l'energia apparente, il fattore di potenza, la componente attiva e reattiva della corrente.

R. L'energia apparente è data da 12 × 120 = 1440 volt-ampère. Il fattore di potenza sarà 926: 1440 = 0,643. A questo fattore corrisponde un angolo di sfasamento di 50°. Il seno di quest'angolo è 0,776. Perciò la corrente attiva sarà 12 × 0,643 = 7,71 Amp. La corrente reattiva: 12 × 0.766 = 9,19.

91. Effetto economico sfavorevole dei circuiti a basso fattore di potenza. — Abbian visto che negli impianti industriali e nelle reti di distribuzione a corrente alternata nelle quali l'energia elettrica è usata prevalentemente per motori elettrici o per altre macchine nelle quali si producono forti campi magnetici, gli effetti della selfinduzione sono molto appariscenti; ossia il fattore di potenza diventa basso. Ciò significa che per utilizzare una certa potenza in watt o chilowatt occorre produrre un numero maggiore di volt-ampère o chilovolt-ampère di quello che sarebbe necessario se il fattore di potenza fosse uguale all'unità. Siccome nei moderni impianti di distribuzione di energia elettrica si tiene costante la tensione e si variano gli ampère a secondo del consumo o del carico, così dovendosi dare un maggior numero di voltampère alla rete, bisogna effettivamente trasmettere un maggior numero di ampère.

Aumentandosi gli ampère trasmessi ed utilizzati bisogna aumentare la sezione dei fili, se non si vuol incorrere in una forte diminuizione del rendimento degli impianti dovuta alle perdite per effetto Joule le quali, come è noto, sono proporzionali al quadrato dell'intensità.

L'abbassarsi del fattore di potenza si risolve quindi nella necessità di fare maggior spesa di fili ove non si voglia incorrere in una forte diminuizione del rendimento degli impianti. (Vedere esempio 1.° al parag. 82).

Anche *le dimensioni delle macchine elettriche*: *motori a c. a., alternatori e trasformatori, sono calcolate in base ai volt ed agli ampère.* Infatti quando si acquistano o si vendono alternatori e trasformatori le trattative di prezzo si fanno sulla base della loro potenza in chilovoltampère e non in chilowatt. Quanto più basso quindi è il fattore di potenza prevedibile tanto maggiore dovrà essere la potenza in chilovoltampère delle macchine e quindi il loro costo.

Per correggere l'effetto nocivo del basso fattore di po-

tenza vi sono diversi mezzi; uno di essi consiste nell'applicazione di condensatori, oppure di motori sincroni.

ESEMPIO. — Un impianto industriale a corrente alternata con 500 volt a 50 periodi consuma 100 chilowatt di energia e una corrente di 250 amp.

Si domanda il fattore di potenza e la capacità del condensatore che sarebbe necessario di mettere in parallelo per correggere lo sfasamento e riportare in sincronismo le fasi dell'intensità e della tensione (fattore di potenza = uno).

R. L'energia apparente è 250 × 500 = 125000 watt. Il fattore di potenza sarà quindi 100000: 125000 = 0,8. A questo sfasamento corrisponde un angolo di ritardo di fase di 37.° La corrente di magnetizzazione od in quadratura sarà:

$$250 \; sen \; \varphi = 250 \times 0{,}6 = 150 \text{ amp.}$$

dove 0,6 è il seno dell'angolo di 37°.

Per compensare lo sfasamento e ridurre a cos φ = 1 l'energia consumata occorre di installare o un condensatore o un motore sincrono della potenza apparente di:

$$150 \times 500 = 75000 \text{ volt-amp.}$$

92. Sistema bifase. — Quanto abbiam detto fin'ora si riferisce a circuiti semplici con una corrente alternata. Si chiama *sistema polifase* un sistema di più circuiti a corrente alternata di pari frequenza e tensione ma aventi le rispettive fasi spostate di un certo angolo. I sistemi polifasi più diffusi sono il *bifase*, il *trifase*, il *sestifase*.

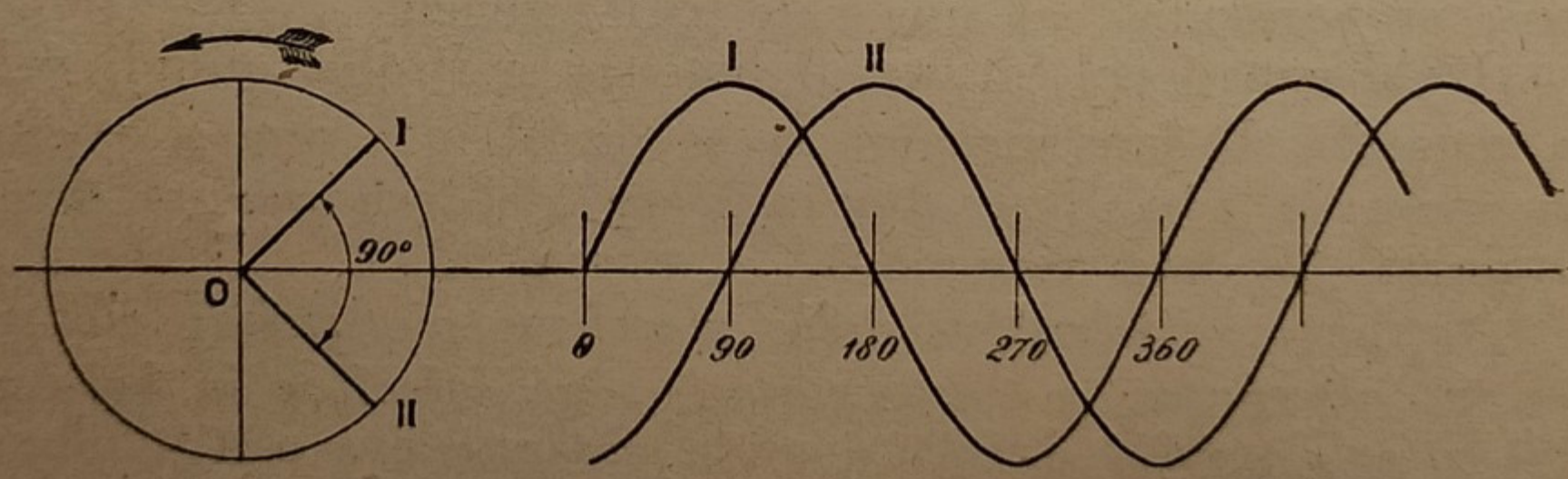


Fig. 152 - Corrente bifase.

Nel sistema bifase i due circuiti posseggono tensioni alternative spostate di fase un quarto di periodo. La rappresentazione delle rispettive sinusoidi e vettori è data dalla figura 152.

Per formare un sistema bifase si dovrebbero impiegare due circuiti completamente separati e cioè 4 fili; praticamente si impiegano tre fili riunendo due fili in uno comune detto di *ritorno* come è chiaramente indicato dalla fig. 153.

In un sistema bifase se *e* è la tensione che vi è fra un filo di una fase e il filo comune o di ritorno, la f. e. m. E che vi è fra le fasi

$$E = e\sqrt{2}$$

ossia: 1,41 *e*.

Se nei due fili di fase I. e II. le intensità I di corrente sono uguali il filo R sarà percorso dalla somma delle due intensità I e II spostate fra loro di 90°. La intensità risultante dalla composizione secondo la regola del parallelogrammo è uguale a:

$$I \times \sqrt{2}$$

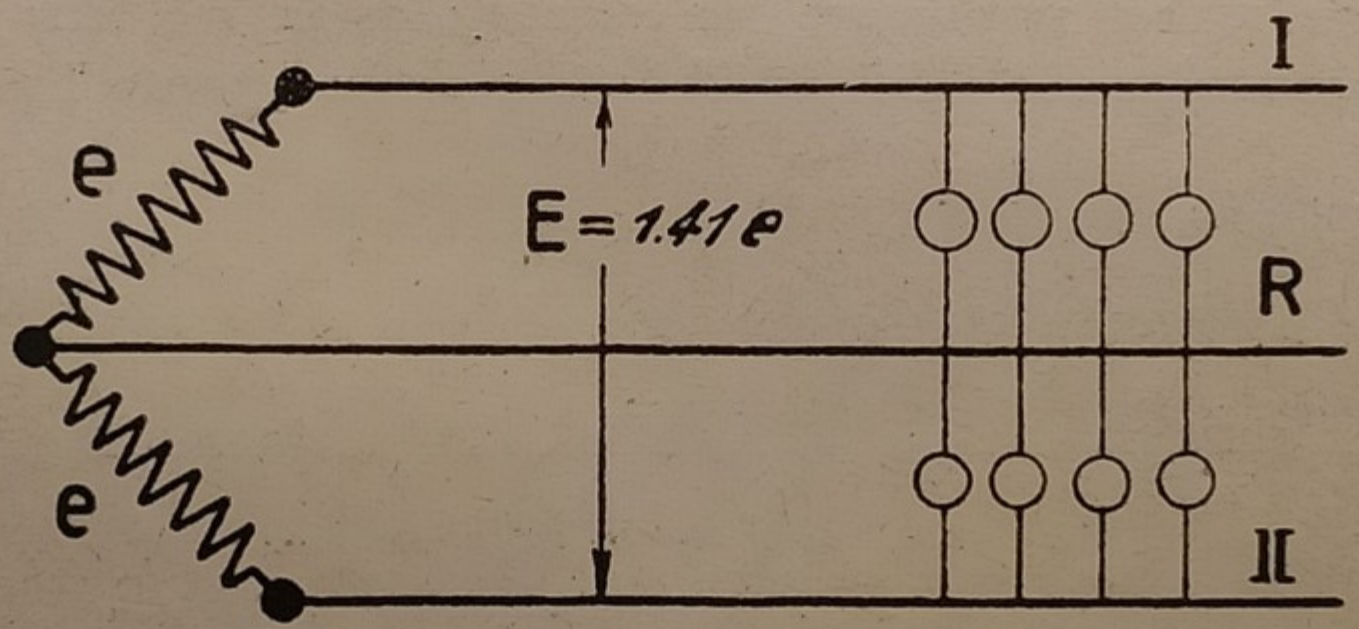


Fig. 153. - Schema di un circuito bifase.

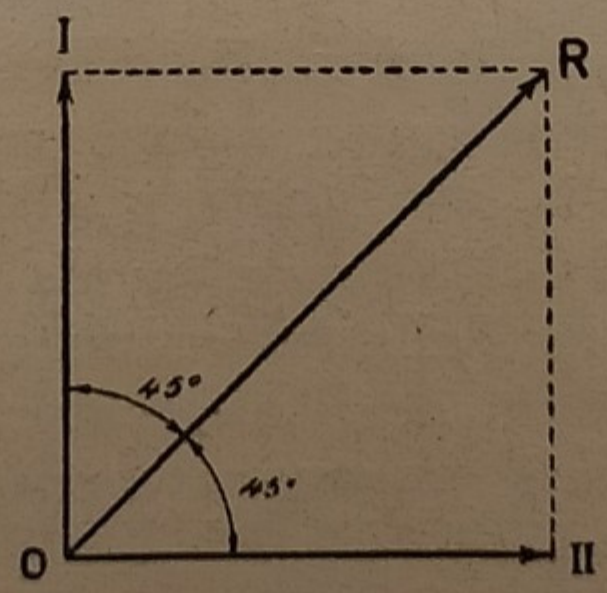


Fig. 154. - Diagramma vettoriale di due correnti bifasi.

poichè difatti la risultante è diagonale di un quadrato. (Figura 154).

Se le due intensità non sono uguali si dice che il sistema è *squilibrato*; la corrente in R è diversa di:

$$I\sqrt{2}$$

La potenza di un sistema bifase equilibrato è data da:

$$W = E \times I \times 1{,}41 \times \cos\varphi = 2\ e\ I\ \cos\varphi.$$

93. Sistema trifase. — Il sistema trifase è di gran lunga il sistema polifase più diffuso per la trasmissione di energia a distanza e distribuzione di forza motrice agli stabilimenti. Esso consiste in un sistema di tre correnti alternate uguali di frequenza e di tensione ma spostate una rispetto all'altra di 120° ossia di un terzo di periodo. (Fig. 155).

Per trasmettere le tre correnti alternate sembrerebbe necessario doversi impiegare tre circuiti ossia sei fili; invece si adoperano tre soli fili poichè in ciascun istante l'intensità

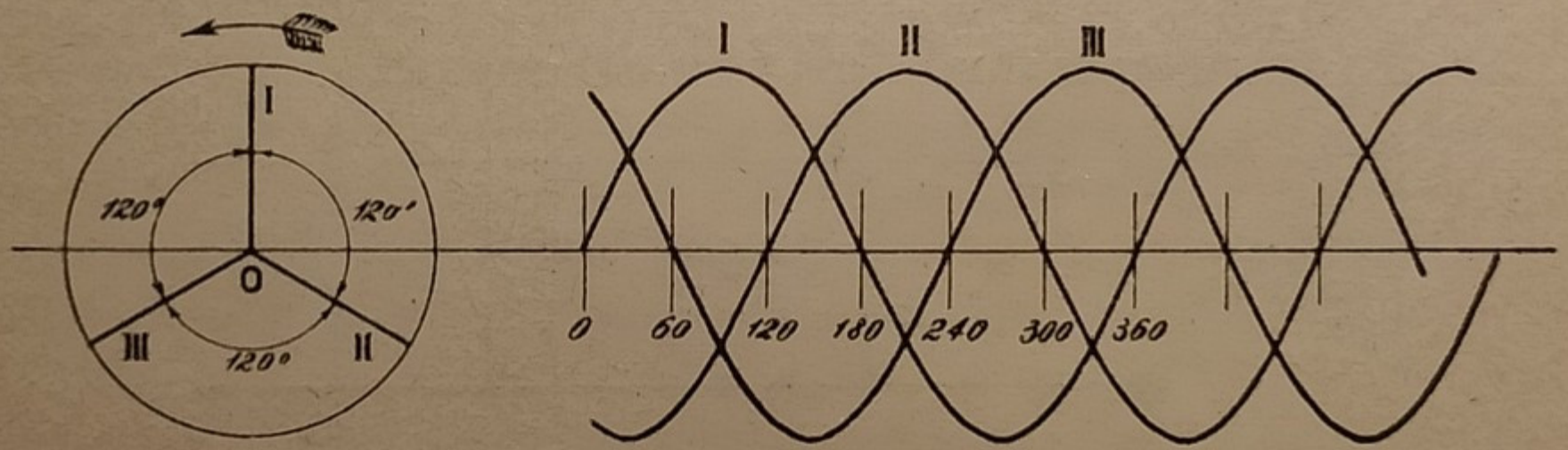


Fig. 155. - Rappresentazione di correnti trifasi.

in una fase risulta uguale a quella delle altre due col segno cambiato. Infatti facendo una sezione nel diagramma cartesiano della fig. 155 in un istante qualsiasi si vede che la somma di due ordinate è sempre uguale e contraria alla terza. La somma algebrica delle tre ordinate è zero.

I tre circuiti interni degli alternatori, trasformatori motori o resistenze trifasi vengono accoppiati fra loro in due modi: *a stella* ed a *triangolo*.

Nel *sistema a stella* (fig. 156) i tre circuiti interni percorsi dalle tre correnti sono riuniti per tre capi in un unico

nodo detto *centro neutro* mentre gli altri capi si allacciano al circuito esterno. Nel concatenamento a stella se *e* è la tensione fra ciascun filo di fase ed il centro neutro, (*tensione stellata o di fase*) la tensione esterna E fra due fili è:

$$E = e\sqrt{3}$$

ossia 1,73 *e*. La corrente in ciascun filo esterno è uguale a quella di ciascun circuito interno.

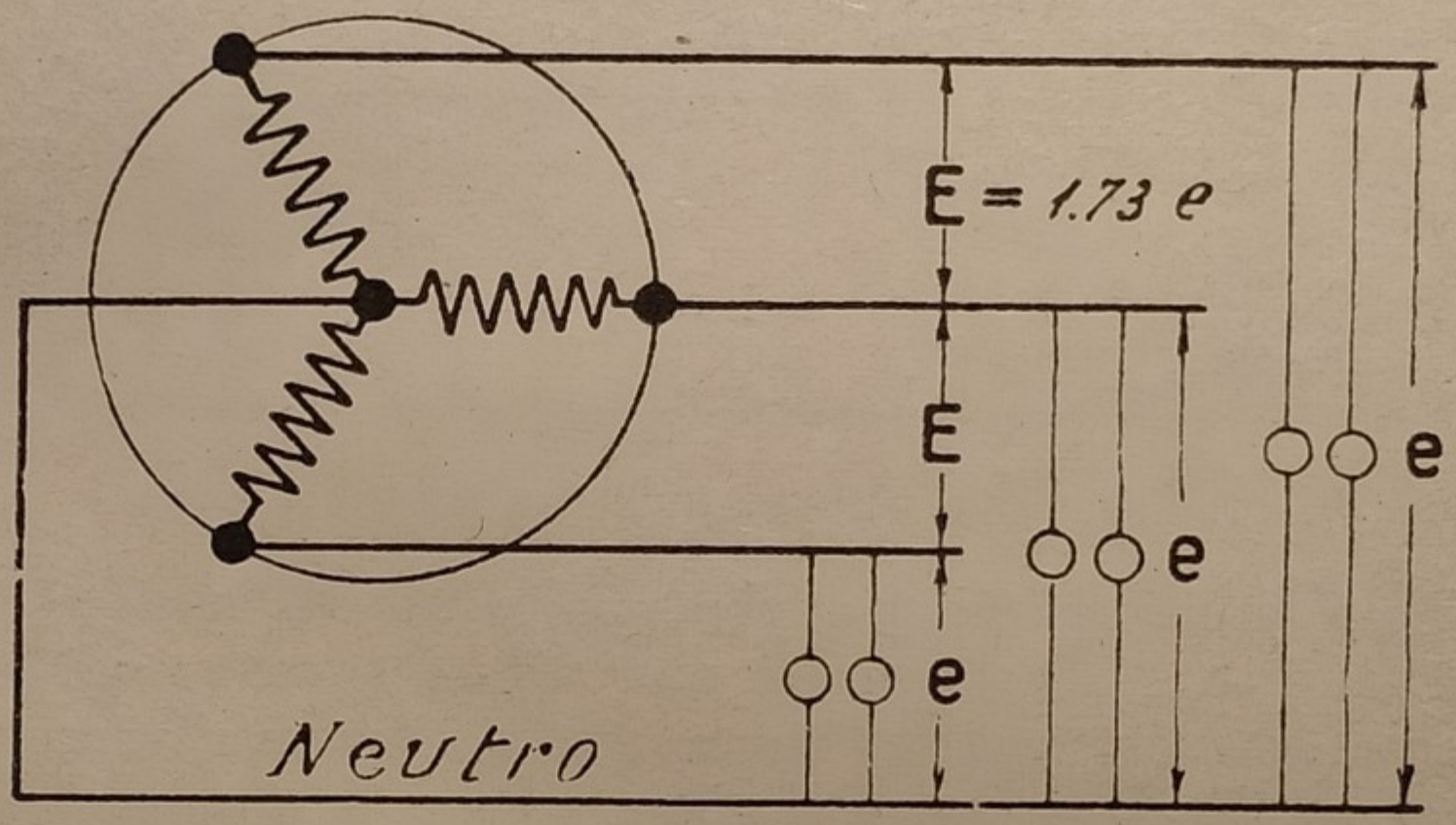


Fig. 156. - Sistema trifase a stella con neutro.

Nel *sistema a triangolo* (fig. 157), le tre fasi sono disposte in serie in modo da formare un circuito chiuso. In ogni istante la tensione di una fase qualsiasi è uguale e contraria alla somma delle altre due e quindi fa equilibrio. Supposto che la corrente sia uguale in tutti e tre i lati del triangolo (*trifase equilibrato*) e se si indica con *i* la corrente in ciascun lato, l'intensità I in ciascun filo del circuito esterno è:

$$I = i\sqrt{3}$$

ossia 1,73 *i*. La tensione fra due fasi qualsiasi del circuito esterno è uguale a quella di ciascun ramo del triangolo.

Nei circuiti trifasi equilibrati risulta quindi sempre in ogni istante, tenendo conto dei segni:

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0$$
$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

Gli apparecchi utilizzatori della corrente (lampade o resistenze) si inseriscono generalmente sulle linee trifasi in due modi: 1. o direttamente fra le fasi; 2. oppure fra le fasi ed un filo neutro. Quest'ultimo sistema si dice *trifase a 4 fili oppure trifase con neutro*. (Fig. 156).

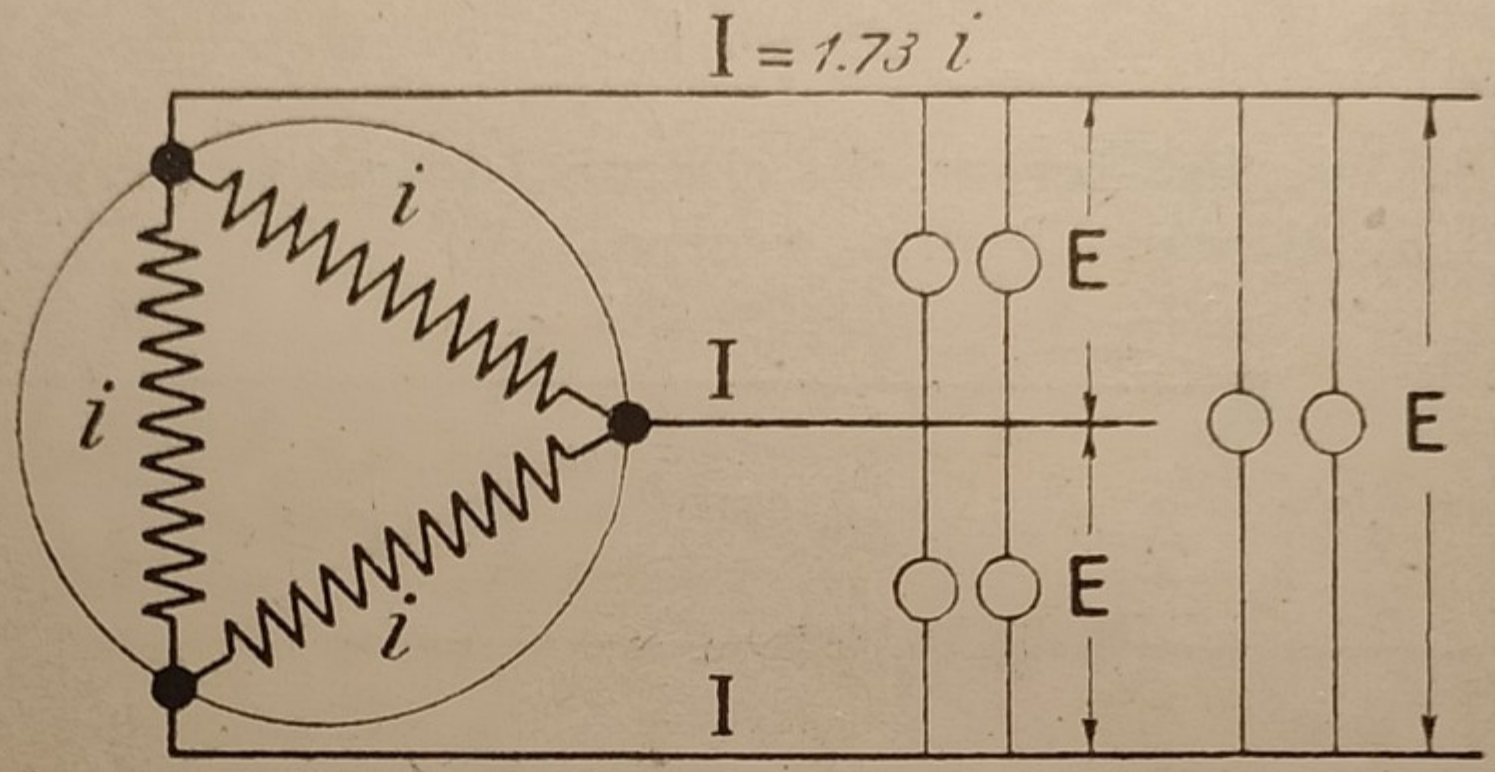


Fig. 157. - Sistema trifase a triangolo.

Nelle applicazioni pratiche più in uso le tensioni E esistenti fra i tre fili di un circuito trifase sono uguali e rappresentabili da tre vettori ruotanti a 120° gradi divergenti da un centro. Si dice che il sistema trifase è *simmetrico;* ma vi sono dei casi in cui le tre tensioni fra i fili non sono uguali e sono spostate di fase di angoli maggiori o minori di 120°. Il sistema si dice allora *assimmetrico*. Però anche nei trifasi assimmetrici di solito, salvo casi eccezionali, si ha che in ciascun istante una tensione è uguale e contraria alla risultante delle altre due.

In quanto alle correnti nei tre fili esse possono essere uguali (*sistema equilibrato*) oppure disuguali (*sistema squilibrato*). Rispetto al centro neutro le fasi delle correnti possono essere in fase colle tensioni stellate oppure (se il sistema è induttivo od asimmetrico) in sconcordanza di fase colle tensioni.

94. Rappresentazione vettoriale dei sistemi trifasi. — La rappresentazione vettoriale di un sistema trifase si fa con tre raggi o *tre vettori* a 120°. (Fig. 158-159). La lunghezza dei tre vettori si fa proporzionale alla ampiezza del valore che si considera (intensità, tensione, intensità di campo).

Sistema a stella. — Riferendoci alla fig. 158 siano O1 - O2 - O3 tre vettori rappresentanti la f. e. m. in ciascun avvolgimento (di motore, trasformatore, alternatore, ecc.) Se il sistema è equilibrato e non vi è spostamento di fase fra la

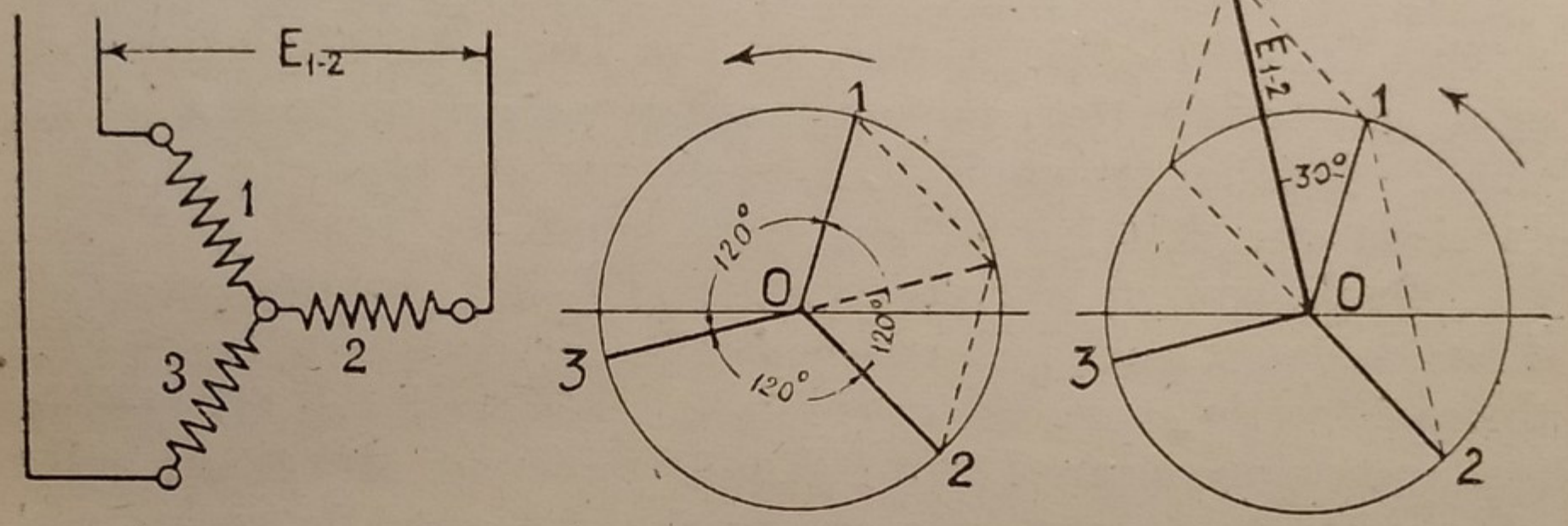


Fig. 158. - Rappresentazione vettoriale di una connessione a stella.

f. e. m. e l'intensità, i tre vettori potranno anche indicare le tre intensità nei rami 1 — 2 — 3. Se il carico è induttivo allora i tre vettori della intensità saranno spostati rispetto a quelli delle f. e. m. In qualsiasi caso una fase, per

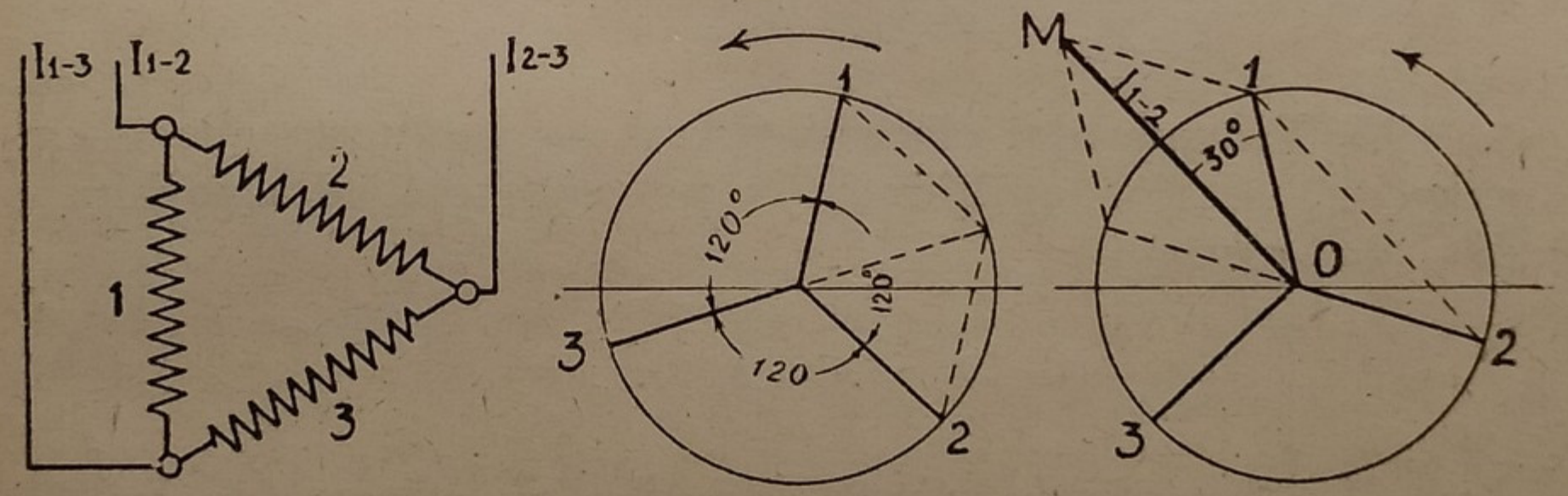


Fig. 159. - Rappresentazione vettoriale di una connessione a triangolo.

esempio la O3, è la risultante della O1 e O2 col segno cambiato.

Ma se consideriamo la tensione fra due attacchi del circuito esterno per esempio delle fasi 1 e 2 essa sarà formata in ciascun istante dalla proiezione sull'asse delle Y di O1 più la proiezione di O2 ossia della proiezione della retta 1-2 (fig. 158 ter.). Se da O tiriamo una parallela OM uguale in grandezza

alla retta 1-2 essa rappresenterà il vettore della tensione tra i morsetti 1--2 del circuito esterno. Tale vettore risulta di 30° ossia di 1/12 di periodo in anticipo rispetto al vettore O1.

Sistema a triangolo. — Consideriamo un sistema di concatenamento a triangolo. (Fig. 159).

Le tre correnti nei tre rami saranno rappresentate da tre vettori O1 - O2 - O3. Se esse sono in fase colle rispettive tensioni gli stessi vettori possono rappresentare anche le f. e. m. nei tre lati del triangolo. Ogni corrente per esempio la O3 è la risultante di O1 e O2 col segno cambiato.

Quale sarà la corrente nei tre fili del circuito esterno? Consideriamo quello che raccoglie le correnti delle fasi 1 e 2. In questo filo scorre *in ogni istante* la corrente di O1 cioè la sua proiezione sopra l'asse OY, più la corrente di O2 che nello stesso istante è data dalla sua proiezione sopra lo stesso asse OY. Cioè la corrente risultante è data dalla proiezione della retta 1-2. Quindi riportando il vettore al centro O basterà tirare una parallela al lato 1-2 ed il vettore OM rappresenterà in lunghezza e posizione l'ampiezza e la fase della corrente $I_{1\text{-}2}$ nel filo esterno. Tale corrente riesce spostata di 30° rispetto alla corrente O1 in anticipo. Lo stesso ragionamento si può ripetere per le altre due fasi.

95. Potenza dei circuiti trifasi. — Supposto che il circuito trifase sia equilibrato, la potenza resa od assorbita è data dalla formola:

$$W = E\ I\ 1{,}73\ \cos\varphi$$

dove W è la potenza in watt, E la f. e. m. efficace fra due fili di fase, I l'intensità in ampère, cos φ il fattore di potenza.

Se indichiamo con *e* la f. e. m. col centro neutro di stella, I l'intensità di un ramo di stella, la potenza resa od assorbita è:

$$W = 3\ e\ I\ \cos\varphi$$

ESEMPI. — 1.° Un alternatore trifase può fornire a pieno carico fasi equilibrate 2000 V. ai morsetti di linea con 20 Amp. Qual'è la potenza apparente e la potenza reale quando il fattore di potenza del circuito alimentato è di 0,8?

R. La potenza apparente dell'alternatore è $2000 \times 20 \times 1{,}73 = 69200$ volt-ampère. La potenza reale sviluppata è invece:

$$2000 \times 20 \times 1{,}73 \times 0{,}8 = 55360 \text{ watt}$$

2.° Un motore trifase consuma 220 volt e 50 ampère con un fattore di potenza 0,8. Il suo rendimento è 0,85. Si domanda la forza sviluppata o forza sull'albero.

R. La potenza effettiva assorbita è:

$$220 \times 50 \times 1{,}73 \times 0{,}8 = 15224 \text{ watt}$$

La forza sviluppata sarà:

$$\frac{15224}{736}\ 0{,}85 = 17{,}6 \text{ HP}$$

3.° Qual'è il fattore di potenza di un motore trifase il quale consuma, secondo le indicazioni di un wattmetro, 6,5 KW, mentre l'amperometro ed il voltmetro inseriti sul circuito di alimentazione segnano 9,16 Amp. e 500 V.?

R. Applicando la formola generale della potenza dei circuiti trifasi:

$$6500 = 500 \times 9{,}16 \times 1{,}73 \times X$$

da cui $X = 0{,}82$ fattore di potenza.

4.° Disponendosi di una corrente trifase a 220 V., si vuol costruire una resistenza trifase che consumi 10 KW adoperando filo di nichel cromo avente una resistività di 1 ohm per metro e per mmq. Calcolare la resistenza in ohm, la sezione e la lunghezza del filo resistente, per connessione a stella e per connessione a triangolo e supposto di far passare 10 Amp. per mmq. Il fattore di potenza è naturalmente uguale a 1.

R. Sia x l'intensità nei fili di alimentazione della resistenza. Avremo:

$$10000 = 220 \times x \times 1{,}73 \text{ da cui } x = 26{,}3 \text{ amp.}$$

Se l'accoppiamento è fatto a stella (fig. 160) la tensione fra il centro neutro dei tre rami di stella ed i morsetti sarà per ciascun ramo:

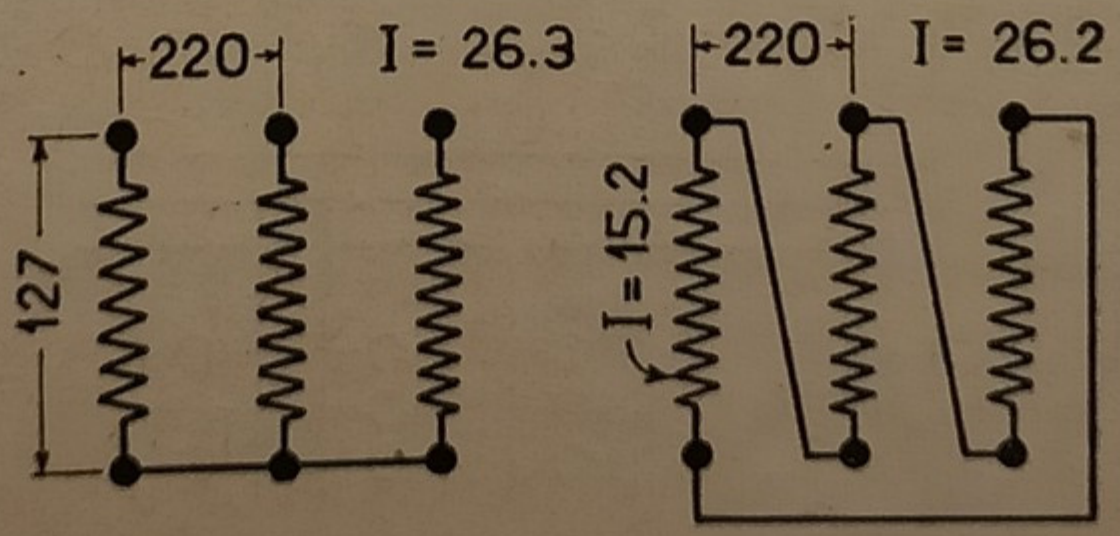


Fig. 160. - Resistenze a stella ed a triangolo.

$$220 : 1{,}73 = 127 \text{ V}$$

Quindi ogni ramo di resistenza dovrà avere per la legge di Ohm:

$$R = \frac{E}{I} \qquad \text{ossia} \qquad 127 : 26{,}3 = 4{,}84 \text{ ohm}$$

Si potrà impiegare del filo di nichel-cromo della sezione di 26,3 : 10 ossia 2,63 mmq. di sezione. La lunghezza sarà data dalla formola:

$$l = \frac{s\,R}{\rho} = \frac{2{,}63 \times 4{,}84}{1} = 12{,}7 \text{ m.}$$

Mettendo le tre resistenze a triangolo, ciascun ramo dovrà assorbire con 220 V. una intensità di 26,3 : 1,73 ossia 15.2 ampère. (Fig. 160).

Il valore della resistenza di ciascun ramo sarà 220: 15,2 ossia 14,5 ohm. Occorrerà quindi un filo di nichel-cromo della sezione di mmq. 1,52 e della lunghezza di $1{,}52 \times 14{,}5 = 22$ m.

5.° Una resistenza trifase a stella ha 8 ohm per fase e consuma 10 KW. Trovare l'intensità e la tensione di ciascuna fase. Trovare gli stessi elementi per connessione a triangolo.

R. Ogni fase consuma 1/3 di 10 KW ossia 3333 watt. Secondo la legge di Joule si avrà $RI^2 = 3333$ watt. Mettendo R, 8 ohm, si trova $I = 20{,}4$ amp. La tensione di ciascun ramo di stella da applicarsi sarà RI ossia $8 \times 20{,}4 = 163{,}2$ volt. La tensione da applicarsi esternamente fra i morsetti sarà $163{,}2 \times 1{,}73 = 282$ volt.

Se le tre resistenze fossero messe a triangolo la tensione nel circuito esterno dovrà essere come prima cioè 163,2 V.; ma l'intensità nei tre fili esterni di alimentazione sarà:

$$20{,}4 \times 1{,}73 = 35{,}29 \text{ amp.}$$

Sia in un caso che nell'altro la potenza assorbita è di 10 KW.

6.° Un trasformatore trifase alimenta sul secondario 150 lampade da 30 watt ciascuna ed a 120 V. Le lampade sono suddivise in tre gruppi da 50 lampade. Si domanda l'intensità totale; quella di ciascun gruppo;

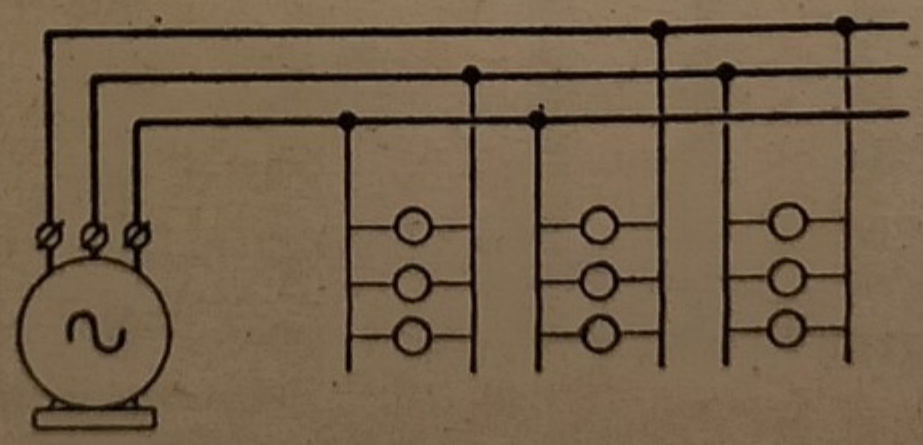


Fig. 161. - Connessione a triangolo.

l'intensità e la tensione nei fili di alimentazione supposto: 1.° di mettere le lampade connesse a triangolo; 2.° di mettere le lampade connesse a stella con filo neutro. (Fig. 161 e 162).

R. L'intensità totale sarà:

$$\frac{150 \times 30}{120} = 37{,}5 \text{ amp.}$$

L'intensità di ciascun gruppo di 50 lampade sarà 1/3 ossia 12,5 amp.

Se i tre gruppi di lampade sono a triangolo l'intensità nei fili di linea sarà $12{,}5 \times 1{,}73 = 21{,}6$ amp. La tensione sarà di 120 V.

Se i tre gruppi di lampade sono disposti a stella l'intensità in ciascun filo di linea sarà 12,5 amp.: la tensione rispetto al filo neutro 120 V.: ma fra due fili di linea sarà: $120 \times 1{,}73 = 207$ volt. (Fig. 162).

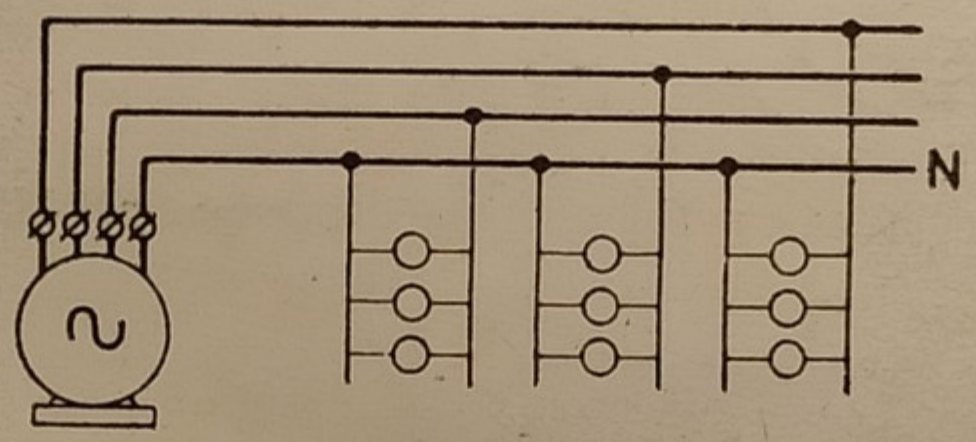


Fig. 162. - Sistema trifase a 4 fili (a stella).

7.° Un circuito trifase a stella di un apparecchio consuma ai morsetti 520 V e 200 A con 50 periodi e 125,9 KW. Si domanda il fattore di potenza, la resistenza di ogni ramo di stella, la reattanza, l'induttanza o coefficente di autoinduzione.

R. Il fattore di potenza sarà:

$$125{,}9 \times 1000 : 520 \times 200 \times 1.73 = 0.70$$

La resistenza di ogni ramo di stella:

$$\frac{125{,}9 \times 1000}{3} = R\ 200^2 \quad \text{da cui} \quad R = 1{,}05 \text{ ohm.}$$

La reattanza si ricava dalla nota formola:

$$2\ \pi\ f\ L = R \text{ tang } \varphi = R\ \frac{\text{sen } \varphi}{\cos \varphi} = R\ \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi}$$

Sostituendo a f il valore 50; a R e cos φ i valori sopra trovati si trova:

$$2\ \pi\ f\ L = 0{,}714 \quad \text{e} \quad L = 0{,}00227$$

96. Campo magnetico ruotante o Ferraris. — Quando due campi magnetici alternativi eccitati da due correnti della stessa frequenza ma spostate di fase, sono disposti inclinati l'uno rispetto all'altro, il campo magnetico risultante è un campo rotativo, come se vi fosse una calamita ruotante intorno ad un centro.

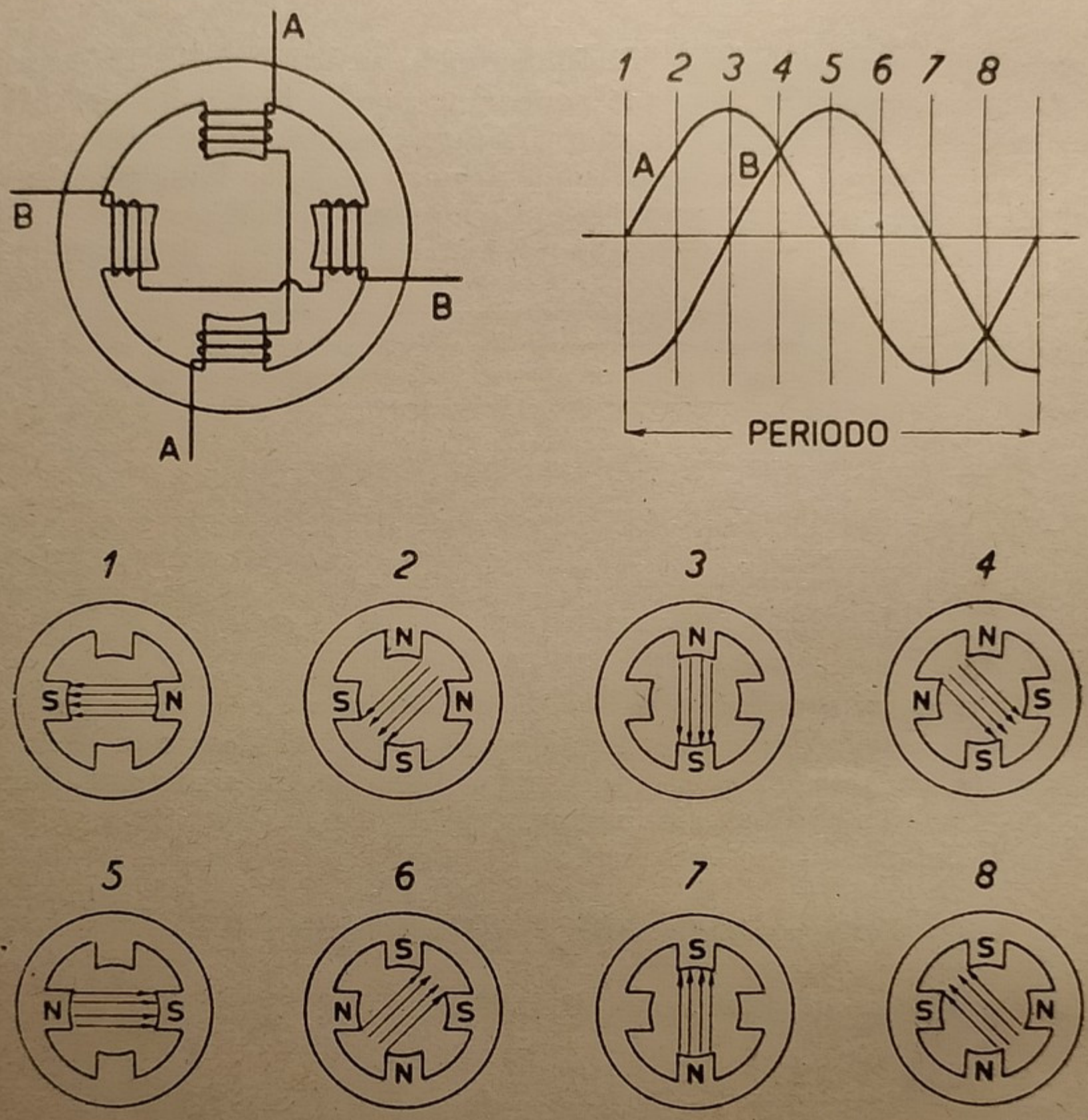


Fig. 163. - Come si forma un campo rotante con due correnti bifasi. I circoli inferiori danno la posizione dei flussi magnetici negli 8 tempi in cui è suddivisa la fase A.

Supponiamo di avere un anello di ferro lamellare con quattro espansioni risvolte verso l'interno ed eccitate con due correnti A e B spostate, per esempio, di un quarto di periodo fra loro. (Fig. 163). Avremo due flussi magnetici alternativi ad angolo retto.

Dopo aver disegnato le sinusoidi delle due correnti, divi-

diamo il periodo di A in 8 tempi uguali e consideriamo per ciascun tempo il flusso magnetico che si forma nell'anello. Supponiamo che la corrente B faccia nella posizione 1 un flusso orizzontale nord-sud; nella pos. 2 il flusso risultante di A e di B si inclina verso il basso; nella pos. 3 diventa verticale; nella pos. 4 si inclina verso destra; nella 5 ritorna orizzontale ma in senso contrario alla pos. 1 ecc. Nel mentre cioè le due sinusoidi hanno compiuto un periodo, il flusso risultante interno all'anello passando da una posizione all'altra ha compiuto un giro. Se la frequenza fosse stata *f*, il campo avrebbe compiuto *f* giri in un secondo.

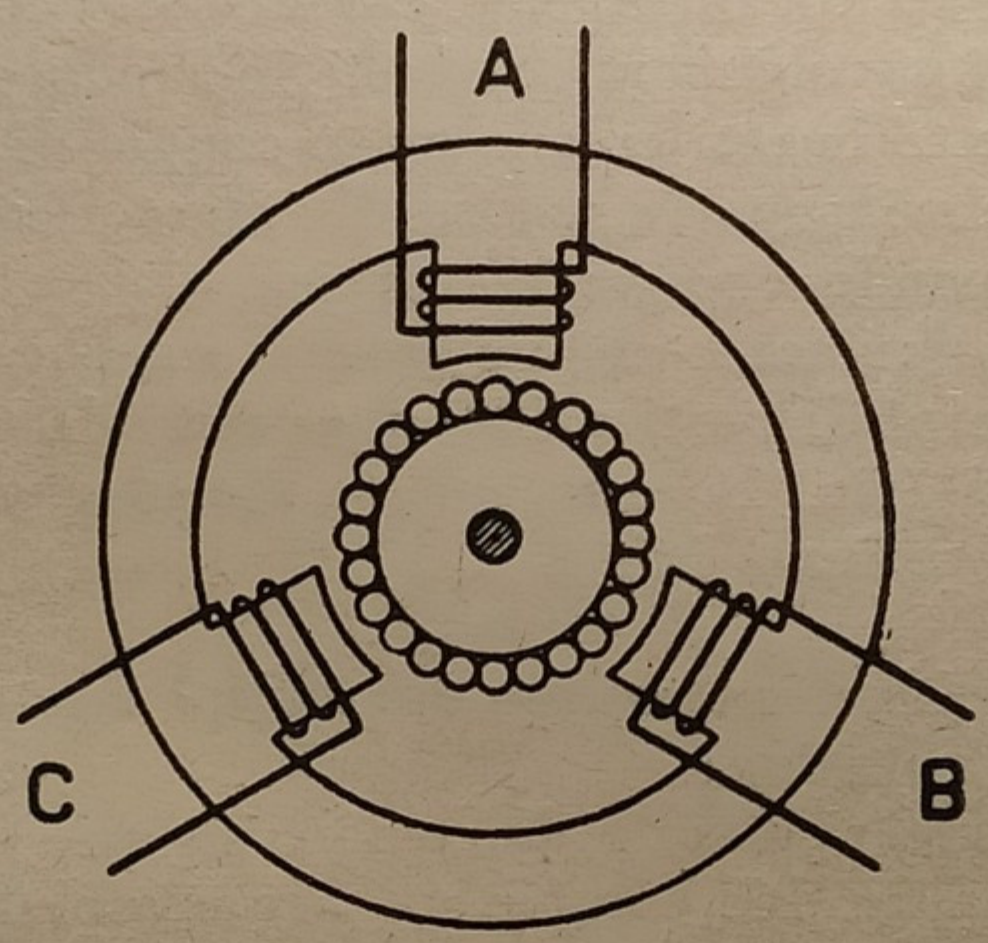


Fig. 164. - Come si può produrre un campo rotante bipolare con circuito trifase.

Se questo è vero mettendo un pezzo di ferro, un ago calamitato, un cilindro di ferro questo dovrebbe girare; e così succede infatti, come si può dimostrare con facili esperimenti.

Se invece di ferro si mette un disco od un cilindro di rame o altro metallo si formeranno in essi delle correnti indotte o di Foucault. Queste correnti formando un campo magnetico per loro conto, il disco verrebbe trascinato in rotazione dal campo magnetico induttore; quindi anche il disco o cilindro di rame sarà obbligato a ruotare nel senso della rotazione del campo induttore.

Questo mirabile fenomeno fu intuito e poi dimostrato

sperimentalmente dal Prof. Galileo Ferraris nel 1887; il campo ruotante si dice anche *campo Ferraris*.

Il campo magnetico ruotante scoperto dal Ferraris ha dato ai costruttori elettromeccanici la base per la costruzione dei *motori asincroni ad induzione*, motori molto semplici senza collettori, di facile costruzione. In tutti questi motori vi è uno *statore* composto di un anello di ferro lamellare portante degli avvolgimenti percorsi da due o tre correnti alternate di ugual frequenza ma spostate di fase. Queste correnti danno luogo ad un campo magnetico Ferraris a due poli, a quattro poli, a sei poli, ecc. Nell'interno dell'anello dello statore gira il *rotore* formato da un nucleo cilindrico di ferro lamellare, portante degli avvolgimenti disposti in modo che le correnti alternate indotte in essi creano tante coppie di campi magnetici quanti ne sviluppa lo statore. Il rotore è così trascinato a girare sviluppando energia meccanica.

Un campo ruotante si può generare anche con un anello a tre poli interni disposti a 120° e percorsi da tre correnti alternate trifasi (fig. 164), in modo affatto analogo a quello descritto con correnti bifasi.

97. Velocità di rotazione dei campi ruotanti; inversione della loro rotazione. — Abbiamo visto che il campo magnetico ruotante risultante dall'azione di due campi alternativi secondo la fig. 163 compie un giro completo ad ogni pe-

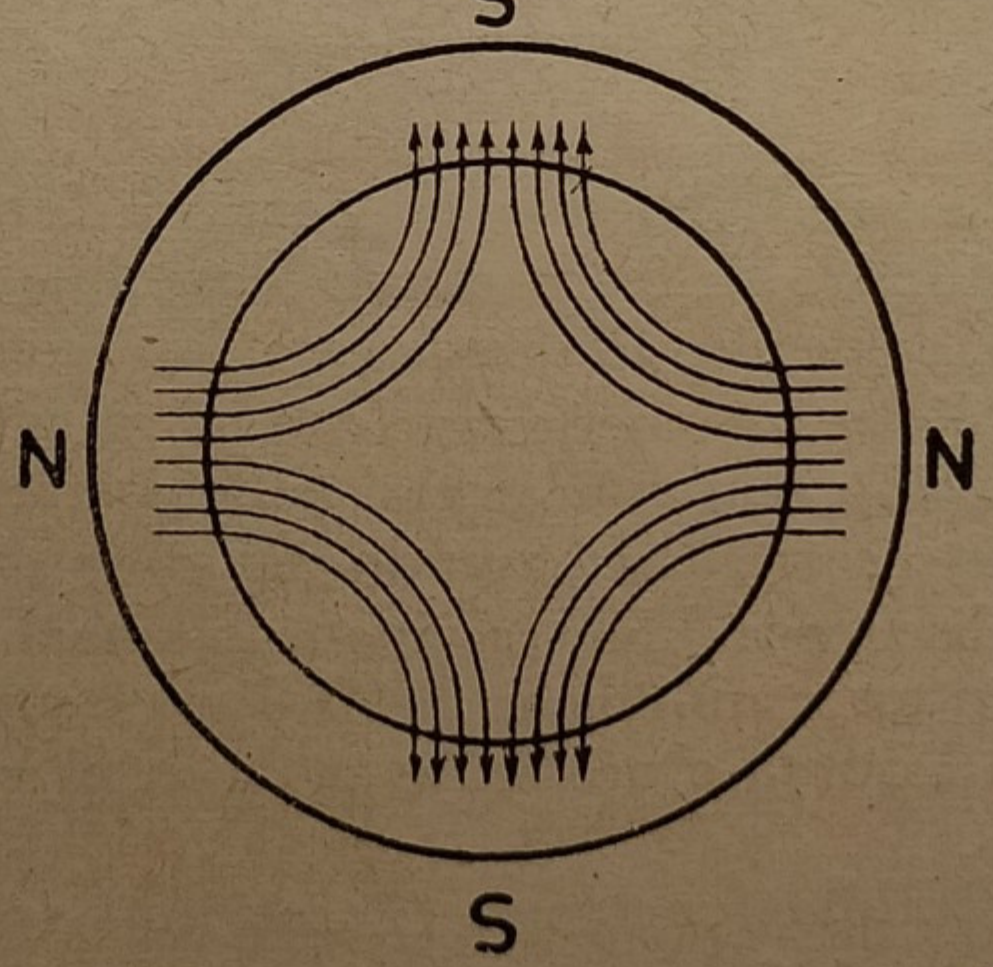


Fig. 165. - Disposizioni dei flussi rotanti di un motore a 4 poli.

riodo ossia compie tanti giri al 1" quanto è la frequenza delle due correnti. Se invece di una sola coppia di poli N-S gli avvolgimenti dell'anello fossero disposti in modo da creare 4 poli N-S-N-S (vedi fig. 165) allora durante un periodo, le correnti farebbero percorrere a ciascun polo mezzo giro; quindi il campo magnetico ruotante compirebbe ogni secondo un numero di giri pari a metà della frequenza.

Ed in generale se p è il numero delle paia di poli del campo risultante ruotante nell'anello e f la frequenza, il numero n dei giri al 1" del campo rotante è espresso:

$$n = \frac{f}{p}$$

ed al minuto primo:

$$n = \frac{60\,f}{p}$$

L'intensità del campo magnetico ruotante dipende, oltre che da quella dei campi alternativi, dalla riluttanza dello spazio interno all'anello.

Se le correnti eccitanti sono bifasi ed i rispettivi campi magnetici hanno gli assi a 90°, il campo ruotante è costante ed uguale a quello che si avrebbe con una corrente continua avente un valore pari all'ampiezza (valore massimo) di una delle due correnti bifasi.

Se il campo ruotante è ottenuto dall'azione di tre campi alternativi eccitati per mezzo di tre correnti trifasiche, e i tre campi sono disposti a 120°, l'intensità o flusso di detto campo ruotante è uguale a quello che si otterrebbe con una corrente continua pari a una volta e mezzo l'ampiezza di una delle tre correnti.

Da queste regole risulta il modo di calcolare il flusso ruotante nell'anello statorico di un motore.

La direzione della rotazione di un campo è la stessa del senso di successione delle correnti. Se per esempio un campo ruotante è formato da tre campi alternativi di 3 correnti trifasi che si succedono nell'ordine A-B-C il senso di rotazione sarà nei tre avvolgimenti corrispondenti secondo A-B-C-A-B-C ecc. Scambiando due fasi qualsiasi si inverte la successione

delle fasi: per esempio invertendo A con B si ha B-A-C-B e cioè la successione delle fasi si è invertita nel senso C-B-A. Lo stesso risultato si ottiene scambiando gli attacchi degli avvolgimenti di B e C o di A e B. In conseguenza di ciò si deduce la regola generale: *per ottenere l'inversione di rotazione di un campo ruotante con correnti trifasi basta scambiare fra loro due fasi qualsiasi o meglio due attacchi qualsiasi degli avvolgimenti al circuito esterno.*

98. Principi di calcolo delle linee trifasi. — Le linee trifasi con carico non induttivo rappresentano tre resistenze ohmiche disposte a stella. Se indichiamo con P la perdita in volt lungo un filo di fase risultante dalla legge di Ohm, la perdita corrispondente fra due fili sarà 1,73 P. Così ad esempio se per la legge di Ohm lungo un filo di linea si perdono 12 volt, la stessa perdita riferita a quella fra due fili qualunque della linea trifase è di 12 $\times$ 1,73 ossia 20,76 volt.

Se la tensione di linea alla estremità finale è di V volt, la tensione all'origine della stessa linea è V + 1,73 P. Così ad esempio se una linea di trasmissione ha una tensione di 150 volt alla fine e la perdita lungo ciascun filo è di 12 volt, la tensione all'origine ossia al generatore della corrente sarà:

$$150 + 12 \times 1.73 = 170{,}76 \text{ volt.}$$

Nelle calcolazioni delle linee generalmente si fissa a priori la perdita percentuale di tensione o di potenza che varia di solito fra il 5 e il 10 per cento della tensione di linea o della potenza trasmessa.

La percentuale di perdita di tensione esprime anche quella di potenza nella trasmissione se il carico non è induttivo cioè cos $\varphi = 1$.

Se il carico è induttivo la perdita percentuale di tensione non equivale a quella di potenza. Però nei limiti di cos φ = 0,8-0,9 la differenza è piccolissima.

Nota la caduta di potenziale lungo il filo (considerato come una resistenza) e gli ampère passanti si cava il valore della resistenza ohmica in base alle formole derivate dalla legge di Ohm: R = E : I dove al posto di E si mettono i volt di caduta di tensione. Moltiplicando E $\times$ I si hanno i watt di potenza perduti.

Quando però si tratta di calcolare lunghe linee di trasmissione ad alta tensione, oppure linee corte, ma con grandi intensità, i conduttori non si possono considerare soltanto delle resistenze ohmiche perchè entrano in giuoco la capacità della linea nel primo caso e la selfinduzione nel secondo. Nei fili allora sorgono delle f. e. m. di capacità e di selfinduzione molto notevoli e che essendo sfasate, si devono sommare vettorialmente alle cadute di tensione per resistenza ohmica. Le calcolazioni dei fili diventano complesse e sono trattate nella 2.a parte del libro.

Il peso dei fili di rame si calcola di 0,0089 Kg. per metro e per mmq.

Si può calcolare in modo approssimativo colla regola: il peso in Kg. di un filo di rame al Km. è dato dal quadrato del diametro in *mm.* moltiplicato per 7.

Nelle distribuzioni di energia a bassa tensione con quattro fili (tre di fase e uno neutro) il filo neutro si può tenere di sezione minore di quello dei fili di fase (circa la metà).

ESEMPI. — 1.° Ad una linea trifase colla tensione di 2000 volt tra fase e fase alla estremità finale, si assegna una perdita dell'8 per cento. Quale sarà la tensione all'origine e quale la caduta di tensione per ciascun filo?

R. La perdita sarà $2000 \times 0{,}08 = 160$ volt; perciò all'origine la linea deve avere una differenza di potenziale di $2000 + 160 = 2160$ volt. Ciascun filo di linea avrà fra le sue estremità una differenza di potenziale o caduta di $160 : 1{,}73 = 92$ volt.

2.° Una linea trifase lunga 20 chilometri trasmette una corrente di 5 ampère per filo con una tensione di 5000 volt fra le fasi. La sezione dei fili di rame della linea è di 20 mmq. Qual'è la perdita in volt e la perdita percentuale supposto un fattore di potenza prossimo a uno?

R. La resistenza di ciascun filo è espressa da:

$$R = \frac{20000}{20} \times 0.017 = 17 \text{ ohm}$$

in cui 0,017 è il valore della resistività del rame.

La corrente in ciascun filo essendo di 5 ampère, la caduta di tensione sarà $17 \times 5 = 85$ volt e fra i fili di linea diventerà: $85 \times 1{,}73 = 147$ volt. Questa caduta di tensione o perdita risulterà percentualmente dalla proporzione:

$$\frac{147}{5000} = \frac{X}{100} \text{ da cui si cava } X = 3 \text{ per cento.}$$

3.° Un alternatore trifase deve alimentare un impianto di forza motrice e illuminazione elettrica di uno stabilimento lontano 500 mt. per un complessivo di 5000 watt col fattore di potenza media di 0,8. Si domanda quale sarà la sezione dei fili di linea ammessa una perdita dell'8%, e che la tensione delle lampade e motori sia di 150 volt.

R. Troviamo anzitutto l'intensità della corrente consumata dallo stabilimento sapendo che:

$$W = E\ I\ cos\ \varphi\ 1{,}73$$

Avremo quindi:

$$5000 = 150 \times I \times 0.8 \times 1{,}73$$

da cui si cava I = 24,4 ampère di intensità in ciascun filo.

La perdita di tensione è assegnata dell' 8 per cento dei 150 volt ossia $150 \times 0{,}08 = 12$ volt tra fase e fase. Lungo ciascun filo la perdita sarà:

$$12 : 1{,}73 = 7 \text{ volt.}$$

Il problema si riduce a trovare quale sarà la sezione di un filo di rame lungo 500 metri percorso da una intensità di 24,2 amp, e avente una caduta di tensione di 7 volt. Per la legge di Ohm:

$$R = \frac{7}{24.2} = 0.289$$

ed essendo:

$$R = r\,\frac{l}{s}$$

dove r è la resistività del rame ossia 0,017 si ha:

$$0.298 = 0.017\ \frac{500}{s}$$

da cui si cava la sezione s è uguale a 29,4 mmq.

PROBLEMI DA RISOLVERE.

1.° La tensione fra due fili di una linea trifase è all'origine di 3000 volt e quella di arrivo di 2700 volt. Quanto è la perdita di tensione in ciascun filo e quale la perdita percentuale rispetto alla tensione di origine?

2.° Ciascun filo di una linea trifase è percorso da una corrente di 15 amp. la quale vi crea una caduta di tensione di 25 volt. La linea

trasmette 15 chilowatt. Qual'è la perdita percentuale di energia. Quale la sezione dei fili ammesso una lunghezza di 600 metri.

3.° Una linea trifase lunga 1000 m. è formata con tre fili da 6 mm. di diametro. Fra i fili esiste all'estremità finale 500 volt e la linea trasmette 60 chilowatt con fattore di potenza pari a 0,7. Si domanda: 1.° la resistenza e la caduta di tensione in ciascun filo; 2.° la tensione all'origine; 3.° la perdita percentuale di tensione e di energia.

4.° Calcolare la sezione e peso dei fili di una linea trifase lunga 300 mt. capace di trasmettere 20 chilowatt di potenza con cos $\varphi = 1$ alla tensione di 250 volt e colla perdita di energia nei fili del 10 per cento. Quale sarebbe la sezione e peso dei fili se cos φ fosse uguale a 0,6.

5.° Un'abitazione ha 90 lampade da 25 candele da 1,2 watt per candela suddivise sulle tre fasi di un linea trifase da 110 volt. L'abitazione è lontana 320 mt. dalla linea principale del paese. Calcolare la sezione e peso dei fili necessari per la linea di allacciamento assegnando una perdita del 5 per cento.

CAPITOLO VI.

Unità di misura, istrumenti di misura e misurazioni elettriche

99. Generalità. — Si dicono unità di misura quei campioni che sono stati scelti collettivamente per misurare le diverse grandezze che si incontrano nella vita comune, nella fisica, nella meccanica, nell'elettricità ecc., come il metro, il litro, il chilogrammo, l'àmpère, il grado centigrado ecc.

Le unità di misura elettriche e del tempo e qualche altra sono state unificate d'accordo fra tutte le nazioni del globo in memorabili congressi; invece le unità di lunghezza, volume, peso, che sono le più comuni essendo derivate da antichissime tradizioni fra i popoli, hanno valori diversi da nazione a nazione.

Le principali unità si possono classificare:

1.° *Unità geometriche* per misure di lunghezze, superfici, volumi, angoli, ecc.

2.° *Unità di tempo.*

3.° *Unità meccaniche* per la misura della velocità, accelerazione, forza, coppia, lavoro, potenza, pressione, densità, ecc.

4.° *Unità magnetiche* per la misura dell'intensità del campo, induzione, permeabilità, ecc.

5.° *Unità elettriche* per misurare la forza elettromotrice, intensità, resistenza, coefficiente di selfinduzione, capacità, ecc.

6.° *Unità termiche* per misure della temperatura e quantità di calore.

7.° *Unità fotometriche* per la misura delle intensità delle fonti luminose, della chiarezza delle superfici, del flusso luminoso ecc.

Nel congresso di Parigi del 1881 i delegati delle principali nazioni considerando che tutte le unità di misura meccaniche, elettriche, magnetiche potevano derivarsi dalle tre sole unità di misura di lunghezza, di massa e di tempo si convenne di adottare come base di tutte le misure magnetiche ed elettriche le tre unità fondamentali, *centimetro, grammo, secondo*. Le unità derivate da queste unità fondamentali formano il *sistema assoluto* di unità di misura o unità C. G. S.

Ma le misure espresse con queste tre unità, applicate ai casi pratici portavano a numeri che erano o estremamente grandi o estremamente piccoli. Cosicchè si riconobbe subito la necessità di creare delle unità di misura multiple o sottomultiple delle unità del sistema C. G. S., assegnando loro dei nomi per distinguerle dalle unità fondamentali. Tali unità derivate per l'uso pratico nell'industria e nella tecnica formarono il sistema delle *unità pratiche* di misure (1).

Per l'elettricità le unità di misura si distinguono in *elettrostatiche* ed *elettromagnetiche*. Le prime prendono base definendo come unità di carica elettrica quella che respinge una uguale alla distanza di un centimetro colla forza di una dina. Le seconde invece partono dalla unità di magnetismo definendola come quella che respinge una uguale alla distanza di un centimetro colla forza di una dina. Da questa si cava la definizione di unità di campo, di intensità, di f. e. m. ecc.

L'espressione delle grandezze elettriche colle due unità riescono numericamente molto differenti.

Le unità elettrostatiche sono adoperate solo per alcuni casi di studio e di esperienze di elettricità statica.

---

(1) Per esprimere lunghezze, masse estremamente piccole come quelle degli atomi, delle onde luminose ecc., si adopera il milionesimo di millimetro, ossia il centomilionesimo di un centimetro (10^{-8} cm.) e si dice angström. Nella misura delle onde luminose si adopera il micron che è il millesimo di millimetro (10^{-4} cm.) e si indica colla lettera greca μ Per esempio la lunghezza delle onde luminose del rosso sono fra 0,694 μ e 0,602 μ; un micron = 10^4 angström.

Le unità elettromagnetiche sono di gran lunga più impiegate.

100. Definizione delle unità fondamentali del sistema C. G. S.

Centimetro dovrebbe corrispondere a 1/4.000.000.000 della lunghezza di un meridiano terrestre, ma effettivamente è la centesima parte del metro campione che si conserva a Sèvres in Francia.

Grammo è il peso di un centimetro cubo di acqua distillata a 4° C.

Secondo è 1/86400 della durata di un giorno solare medio.

Da queste unità fondamentali si deducono le seguenti:

Unità geometriche: il centimetro quadrato (cmq.), il centimetro cubo ($cm.^3$), il radian. Quest'ultimo serve per la misura degli angoli ed è l'angolo che sottende un arco lungo un centimetro di un circolo col raggio di un centimetro.

Unità meccaniche:

1.° di peso = grammo (gr.).
2.° di densità = grammi per $cm.^3$
3.° di velocità = centimetro al 1".
4.° di accelerazione = centimetro al 1".
5.° di forza = quella che imprime alla massa di 1 gr. l'unità di accelerazione ossia un centimetro al 1". - Si dice *dina*. Una dina è 1/980 di gr.
6.° di pressione = dine per cmq.
7.° di lavoro o energia = quella corrispondente alla forza di una *dina* che si sposta nella direzione della forza di un centimetro. Questa unità si dice *erg*.
8.° di potenza = quella sviluppata da un erg al 1".

Unità magnetiche:

1.° di polo ossia di quantità di magnetismo o di massa magnetica = quella che respinge una massa uguale colla forza di una dina.
2.° di intensità di campo o forza magnetizzante = è quella del campo nel quale per ogni punto l'unità di massa ma-

gnetica è sollecitata colla forza di una dina — si chiama Gauss e corrisponde ad una linea per cmq.

3.° di flusso magnetico è quella di flusso magnetico passante per un cmq. di sezione retta quando l'intensità è di un Gauss. Si chiama *Maxwell*.

Unità elettriche principali:

1.° = di intensità o di corrente: è l'intensità che percorrendo 1 cm. di filo disposto secondo arco con raggio di 1 cm., esercita sulla unità di massa magnetica nel centro dell'arco la forza di una dina.

2.° di forza elettromotrice: è quella assorbita da una corrente unitaria in un conduttore quando si produce il lavoro di un erg al 1". Si può anche definire: la f. e. m. che si produce per induzione in un conduttore lungo un centimetro che taglia normalmente un flusso magnetico della intensità di un Maxwell colla velocità di 1 cm. al 1".

3.° di resistenza: è la resistenza in cui la unità di intensità provoca una caduta di potenziale pari ad una unità di f. e. m.

4.° di quantità di elettricità: è quella corrispondente ad una unità di corrente in un 1".

5.° di lavoro o quantità d'energia = quella prodotta o consumata dalla unità di corrente, colla f. e. m. unitaria in 1" - corrispondente ancora ad 1 erg.

6.° di potenza = quella corrispondente ad 1 erg al 1".

7.° di capacità = corrisponde a quella di un condensatore che colla f. e. m. unitaria assorbe una quantità unitaria di corrente, ecc.

101. Definizione delle principali unità pratiche di misura; loro denominazione. — Queste unità pratiche furono scelte nel Congresso di elettricità di Chicago del 1901 e sono:

Ohm = unità di resistenza pari a 10^9 volte l'unità asoluta C. G. S. Corrisponde a quella di una colonna di mercurio lunga 106 cm. e della sezione di 1 mmq. alla temperatura del ghiaccio fondente.

Ampère = unità di intensità pari a 1/10 della unità assoluta C. G. S. e corrisponde a quella corrente che deposita in

una soluzione di nitrato d'argento 0,001118 gr. di argento al 1".

Volt = unità di f. e. è quella che applicata alle estremità di resistenza di un ohm produce l'intensità di un ampère. Il volt è 10^8 l'unità assoluta C. G. S. sopra citata.

Coulomb = unità di quantità di corrente ed è quella prodotta o consumata da un ampère in un 1"; corrispondente a 1/10 dell'unità assoluta.

Joule = unità di lavoro o energia elettrica; è la quantità di energia elettrica consumata in un 1" da un ampère attraversando la resistenza di 1 ohm ossia provocando una caduta di tensione di 1 volt = 10^7 unità C. G. S.

Watt = è l'unità di potenza elettrica consumata o prodotta da un ampère colla f. e. m. di un volt. E' uguale a 10^7 unità C. G. S.

Farad = è l'unità di capacità, corrispondente a quella di un condensatore che caricato colla differenza di potenziale di 1 volt assorbe un coulomb = 10^{-9} unità C. G. S.

Henry = è l'unità di induttanza o di coefficiente di selfinduzione è l'induttanza di un circuito nel quale una variazione di un ampère al 1" produce una f. e. m. di induzione di un volt.

Si è osservato che anche queste unità applicate alla misura di quantità elettriche sono per molti casi o troppo grandi o troppo piccole di modo che l'espressione in numeri riesce ancora o troppo frazionaria o con troppi zeri. Si sono perciò introdotte per ciascuna unità delle unità multiple o sottomultiple; queste poi, prendono il nome dell'unità con dei prefissi. Tali prefissi sono il *deci*, *centi*, *milli*, *micro* per indicare i sottomultipli di 1/10; 1/100; 1/1000; un milionesimo; *etto*, *chilo*, *mega* per indicare i multipli corrispondenti a 100, 1000, un milione di volte le sopradette unità.

102. Classificazione degli strumenti elettrici di misura. — Gli strumenti per misurazioni elettriche si possono classificare in diverse categorie a seconda del principio di costruzione, dello scopo od impiego, delle grandezze da misurare.

Anzitutto vi sono due categorie di strumenti che si distinguono quasi nettamente e sono:

1.° *Gli strumenti scientifici da laboratorio.*
2.° *Gli strumenti di misura industriale.*

I primi comprendono i galvanometri di precisione, i voltametri, i galvanometri balistici, le bussole delle tangenti, gli elettrodinamometri e le bilancie elettrostatiche ed elettrodinamometriche, i potenziometri, gli elettrometri assoluti.

Alla seconda categoria appartengono gli istrumenti più usati per quadri, per verifiche, per laboratori industriali.

Gli strumenti industriali si dividono:

1.° *Strumenti indicatori* che segnano i valori medi istantanei o efficaci delle diverse grandezze elettriche (tensione, intensità, potenza, resistenza, ecc.) mediante indici sopra quadranti.

2.° *Strumenti registratori* che segnano e registrano sopra una lista di carta il *diagramma* delle grandezze da misurare, per mezzo di penne scriventi. (Amperometri, voltometri e wattometri registratori).

3.° *Strumenti integratori* che fanno la somma o l'integrazione della corrente o dell'energia elettrica consumata e comprendono i *contatori ampèrorametri* e i *contatori wattorametri;* i *contatori orari*, ecc.

A seconda del principio di costruzione gli apparecchi elettrici di misura industriali si dividono in *elettromagnetici, magnetoelettrici, elettrodinamici, elettrostatici, termici od a filo caldo, ad induzione ed a campo magnetico Ferraris.* Ne diamo più avanti la descrizione.

Infine a seconda delle grandezze da misurare gli strumenti industriali si dividono:

Amperometri o misuratori dell'intensità della corrente.
Voltometri misuratori della differenza di potenziale.
Wattometri misuratori della potenza dei circuiti.
Ohmmetri misuratori di resistenze in generale molto grandi.
Fasometri che misurano lo spostamento di fase fra la intensità e la f. e. m. delle correnti alternate.
Frequenziometri che misurano la frequenza del c. a.

Ondografi strumenti registratori che riproducono l'andamento della f. e. m. o della intensità della c. a. in un periodo. Si dicono anche *oscillografi*.

Tutti gli strumenti industriali indicatori o registratori portano un quadrante su cui è tracciata una *scala* delle grandezze che misurano. Tale scala viene dai costruttori tracciata in base a prove di confronto con altri strumenti, operazione che si dice *taratura*. Ma nei laboratori scientifici vi sono degli strumenti da cui si possono desumere le grandezze elettriche da misure di lunghezza, di peso e di tempo. Tali strumenti si dicono *assoluti*. Ad aiutare le misurazioni alcuni laboratori scientifici sono autorizzati a costruire e diffondere dei *campioni di resistenze, pile campioni* così come si costruiscono metri, litri, chilogrammi campioni.

Gli strumenti di misura comunemente impiegati possono essere a seconda dell'uso divisi in due categorie: *tipi portatili o da laboratorio e tipi da quadro*.

I primi servono per laboratori scientifici, per verifiche degli impianti, controlli di consumo, di contatori, taratura di altri strumenti; sono quasi tutti a scala orizzontale, indice a coltello con specchio onde ridurre l'errore di lettura, divisioni fini. Essi si presentano in forme di scatole metalliche o cassette di legno. Gli strumenti da quadro essendo i più comuni e dovendosi mettere su pareti verticali hanno forma di scatola tonda; però anche questi strumenti si costruiscono secondo forme svariate per tutte le necessità della tecnica.

103. Tipi principali di strumenti e loro caratteristiche. — 1.° Negli *strumenti elettromagnetici*, l'equipaggio porta una lastrina di ferro dolcissimo la quale viene respinta da un altro pezzetto di ferro fisso che si trova nel campo magnetico di un rocchetto di filo percorso dalla corrente da misurare ed essendo i due pezzi magnetizzati nello stesso senso. (Fig. 166).

La forza antagonistica è data da molle o da pesi.

Gli strumenti elettromagnetici sono i più comuni per quadri; servono promiscuamente per c. c. e per c. a.; il campo interno è debole, quindi possono essere influenzati dal campo magnetico di conduttori che siano vicini o da quello di

dinamo. Perciò bisogna tenerli piuttosto lontani da altri conduttori a forte intensità.

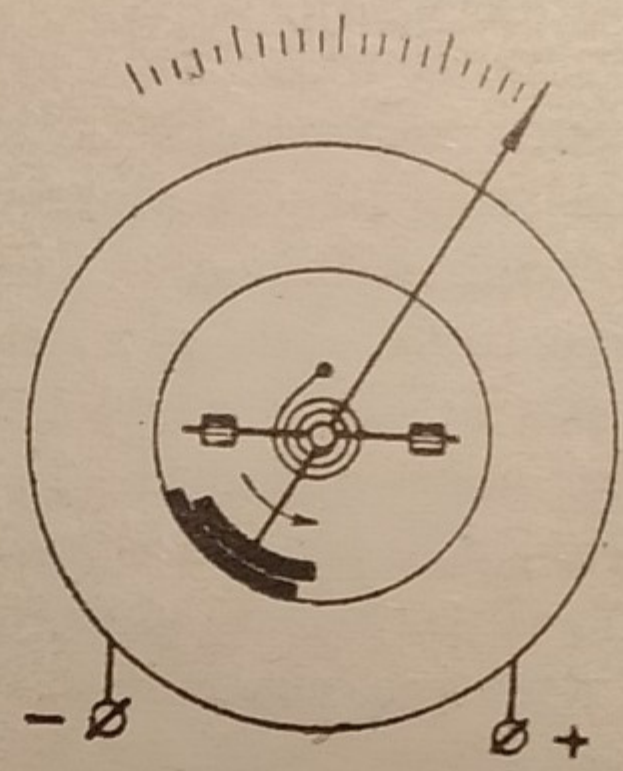


Fig. 166 . Schema di costruzione di strumenti elettromagnetici.

Il rocchetto creatore del campo può essere a filo fino e lungo se l'istrumento serve come voltometro; oppure a filo grosso e corto se serve come amperometro.

2.° Negli *strumenti magneto-elettrici* o di tipo *Weston* vi è un magnete d'acciaio a ferro di cavallo colle estremità che finiscono in due espansioni come quella di una dinamo bipolare; tra le medesime vi è un cilindretto di ferro tornito fisso. (Fig. 167).

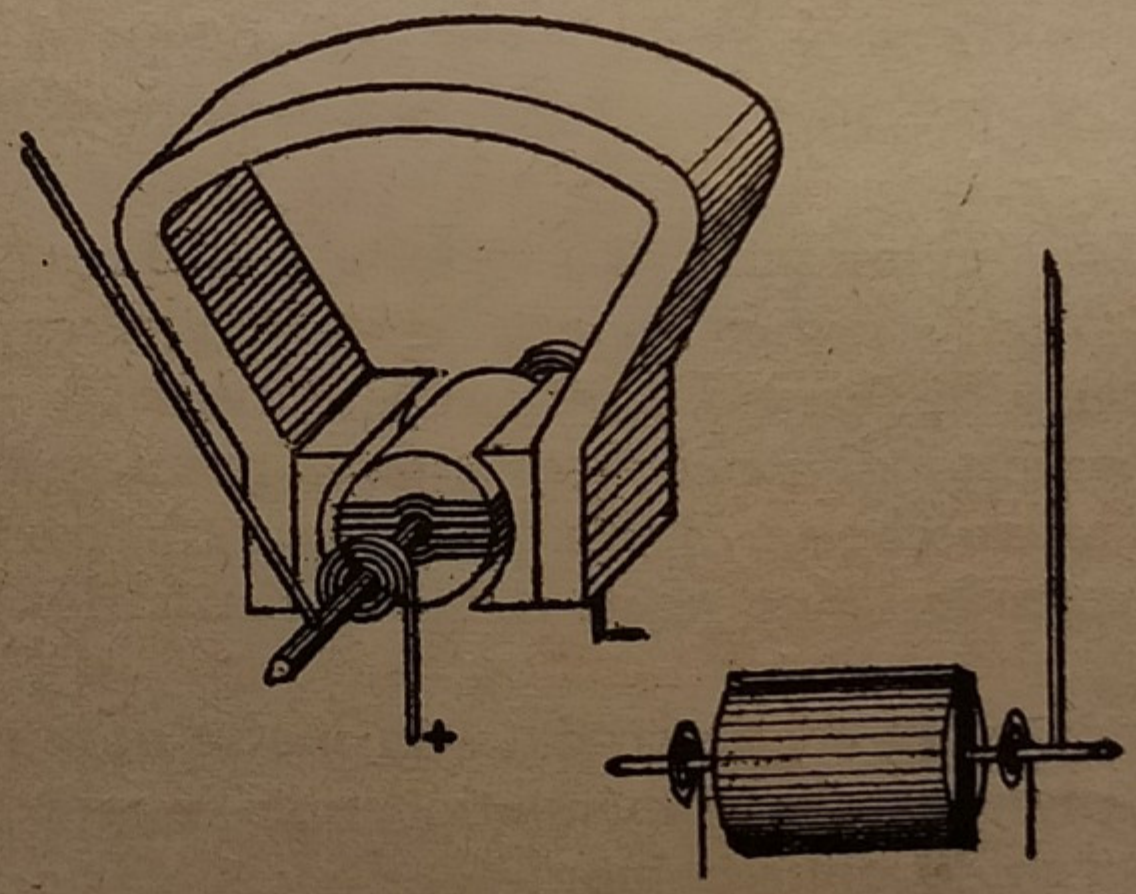


Fig. 167 - Schema di costruzione di strumenti tipo Weston.

Nell'interferro fra le espansioni polari ed il nucleo di ferro si muove un telaietto di filo portato da due perni di sostegno; due piccolissime molle servono a formare la coppia antagonista ed a comunicare la corrente al telaietto.

Il telaietto si trova in un campo magnetico uniforme e passando dalla corrente nei fili è sollecitato a muoversi da una forza che è proporzionale agli ampères.

Normalmente l'istrumento consuma 0,1 a 0,2 Amp.; per ciò, impiegato come voltmetro, il telaietto (composto di 30-50 spire) è in serie con una forte resistenza. Impiegato come amperometro si mette in derivazione sopra un *shunt* (Vedi parag. 108 più avanti). (Fig. 168).

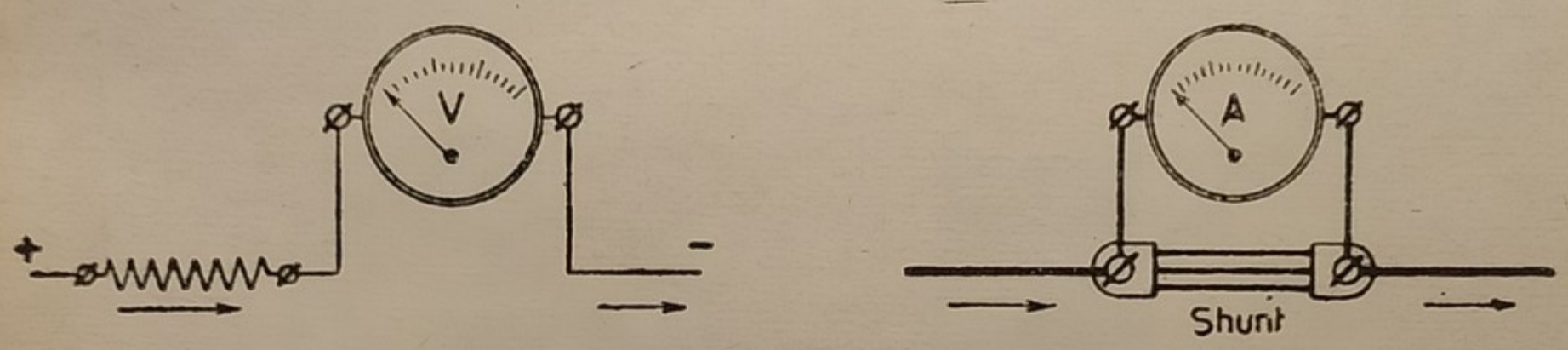


Fig. 163 - Applicazione delle resistenze ai voltmetri e di shunt agli amperometri.

Gli strumenti tipo Weston o magneto-elettrici servono unicamente per corrente continua; sono i tipi più costosi, ma però sono di grande precisione; le scale sono uniformi.

Questi istrumenti avendo un campo magnetico forte non sono influenzati da campi esterni.

3.° *Strumenti elettrodinamici.* Questi sono basati sulla azione elettrodinamica di attrazione o ripulsione fra due circuiti uno fisso ed uno mobile. La costruzione dell'equipaggio mobile è come quella degli strumenti Weston; il campo magnetico fisso è dato da un grande rocchetto di filo che contiene nel suo cavo il telaietto mobile. (Fig. 169).

Nei voltmetri le due bobine sono collegate in serie fra loro; negli amperometri in derivazione sopra uno shunt. Le scale di questi istrumenti sono a divisioni strette e minute verso lo zero e vanno allargandosi molto verso il fondo della scala.

Ma l'applicazione maggiore di questi strumenti è nella costruzione di wattmetri. In tal caso la bobina fissa è percorsa dagli ampères del circuito da misurare; la bobinetta mobile

viene inserita in derivazione sullo stesso circuito ed è quindi percorsa da una corrente proporzionale ai volt. Siccome la coppia che si esercita fra le due bobine è proporzionale ai rispettivi campi magnetici e cioè alle rispettive intensità, così la coppia sarà proporzionale al prodotto degli ampère per i volt ossia ai watt. Inseriti su circuiti a corrente alternata danno il prodotto $W = EI \cos \varphi$.

Gli strumenti elettrodinamici si costruiscono in modo che servono tanto per corrente continua che per corrente alternata. Sono muniti di smorzatore delle oscillazioni ad aria. Avendo un campo debolissimo, possono essere influenzati dai campi magnetici esterni dovuti a macchine elettriche in vicinanza od a conduttori ad alto amperaggio.

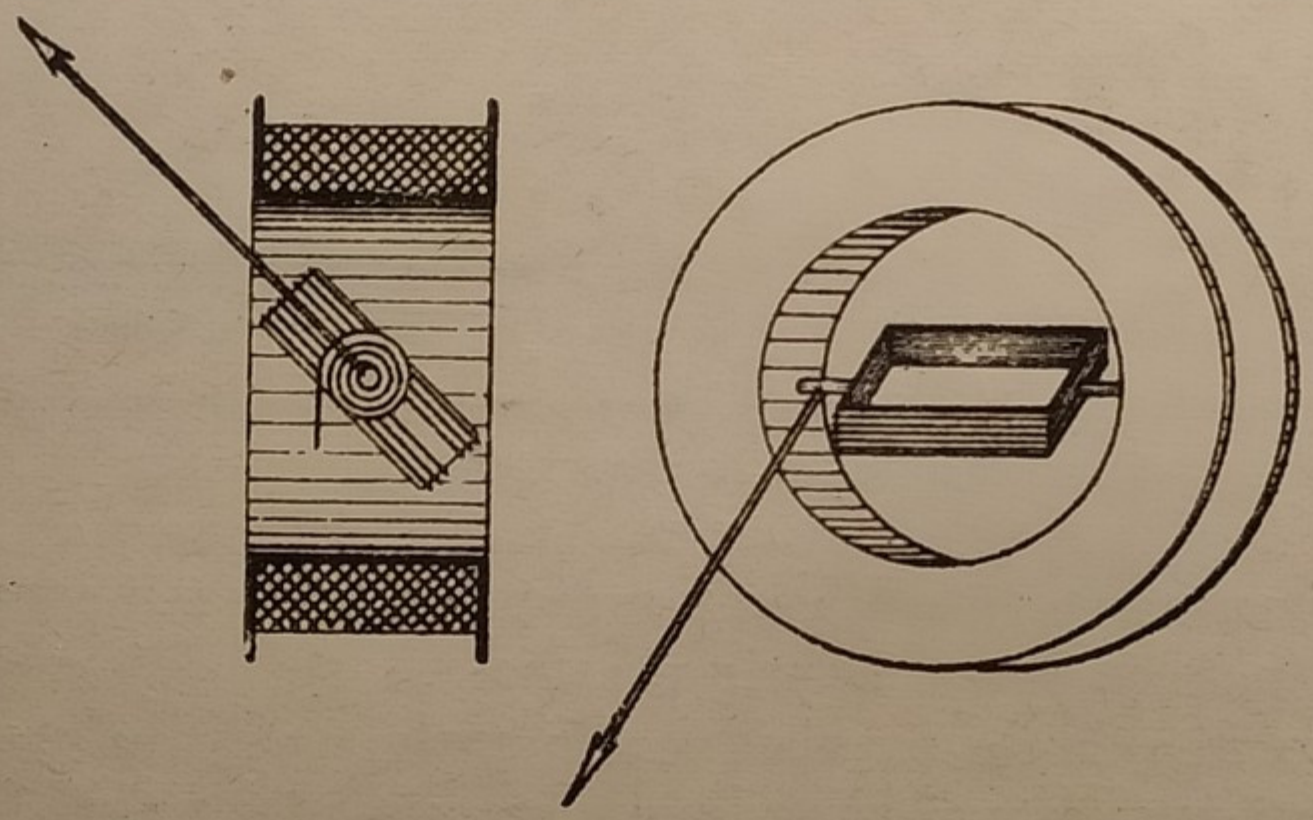


Fig. 169 - Schema di costruzione degli strumenti elettrodinamici.

Usati come apparecchi di confronto, di verifica e di taratura di altri apparecchi richiedono spesso una doppia lettura cioè prima in una posizione, poi in posizione rovescia per eliminare l'azione disturbatrice del campo magnetico terrestre o di altri fili e macchine nelle vicinanze. Consumano da 0,5 a 0,6 Ampère.

4.° *Strumenti elettrostatici*. — L'equipaggio mobile porta una o più ale o armature leggerissime che si trovano affacciate ad altre ale fisse. Tra le armature mobili e le fisse, quando esse si trovano, in comunicazione elettrica fra due conduttori avviene una attrazione. *Servono soltanto come voltometri*, indifferentemente per corrente continua od alternata.

Le forze in giuoco sono in questi strumenti molto deboli,

e possono perciò essere alterate facilmente da cariche elettriche nelle vicinanze, anche da quelle provocate per sfregamento col vetro di custodia degli strumenti.

Sono pochissimo impiegati salvo che nelle misure di laboratorio per altissime tensioni e come istrumenti assoluti, per la misura cariche elettrostatiche.

5.° Gli *strumenti termici* od a *filo caldo* sono fondati sulla dilatazione di fili in conseguenza del riscaldamento provocato in essi dal passaggio della corrente (effetto Joule). Siccome la dilatazione è limitata a pochi millimetri così gli istrumenti portano un dispositivo moltiplicatore del movimento dell'indice dell'istrumento

Questi strumenti sono meno impiegati, perchè sono soggetti a molte cause di errori e sopratutto al fatto che il filo di dilatazione si allunga coll'uso. Il filo consuma da 0,2 a 0,3 Amp. Però quando sono ben tarati colla corrente continua, servono esattamente anche per corrente alternata.

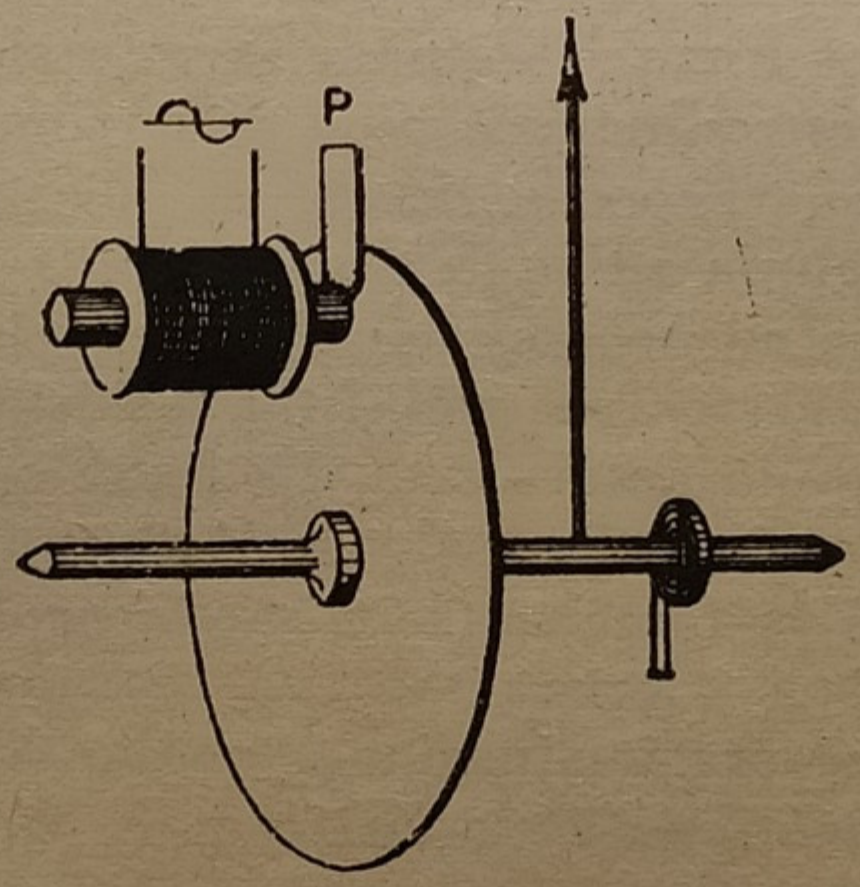


Fig. 170 - Schema di costruzione degli strumenti a induzione.

6.° Gli *strumenti ad induzione* sono impiegati come voltmetri, amperometri e wattometri ma solo per corrente alternata. Sono fondati sulla ripulsione tra un campo magnetico alternativo e le correnti indotte in un disco, portato dall'asse dell'equipaggio. Il campo magnetico alternativo può essere prodotto da una sola corrente (voltmetri e amperometri) oppure da due correnti (wattmetri). Sono strumenti poco usati

quantunque semplici e robusti; la causa della minor diffusione è perchè risentono le variazioni della frequenza e perchè consumano più energia degli altri strumenti. (Fig. 170).

104. Particolari costruttivi comuni degli strumenti industriali. — Salvo poche eccezioni, gli *strumenti indicatori* di misura, che sono gli strumenti di gran lunga più adoperati nella pratica, contengono le seguenti parti:

a) Un organo fisso, formato, a seconda del tipo di strumento, da un rocchetto di filo o da un magnete, o da una lamina (elettrostatici) o da un filo dilatabile (termici), ecc.

b) Un organo mobile detto *equipaggio mobile* al quale è attaccato un indice sottile e leggerissimo. L'equipaggio mobile è formato da un sottile asse d'acciaio imperniato come gli assi degli orologi tra due pietre di agata durissime per ridurre al minimo gli attriti.

L'equipaggio mobile è una specie di bilancere sollecitato da una *forza* o *coppia attiva* creata dalla grandezza che si vuol misurare. Questa forza è data dalla attrazione o ripulsione magnetica od elettrodinamica o da dilatazione di filo, ecc. nei modi che abbiam visto pei diversi tipi di strumenti. Al movimento della coppia attiva fa contrasto una *forza antagonista* variabile da zero ad un massimo in modo che ad ogni valore della coppia attiva corrisponde una posizione di equilibrio colla forza o coppia antagonista. La forza antagonista è data da piccoli pesi o da molle; talvolta dalla torsione di fili. Nei buoni strumenti la forza antagonista è regolabile. Il metodo dei piccoli pesi si adopera solo per istrumenti verticali da quadro o con leggera inclinazione; quello delle molle si adopera per strumenti a faccia orizzontale e per strumenti a bordo delle navi.

c) Per impedire che l'equipaggio mobile e l'indice abbiano ad oscillare, sia per moto proprio d'inerzia pendolare, sia per influenza delle periodiche oscillazioni di corrente, gli strumenti si muniscono di *smorzatori*. Tali smorzatori sono formati da ventole (fig. 171) o da stantuffi di aria o da dischetti d'alluminio giranti fra le branche di un magnete. In questo caso se il disco oscilla, si formano delle correnti di Foucault che per legge di Lenz contrastano il movimento che le produce.

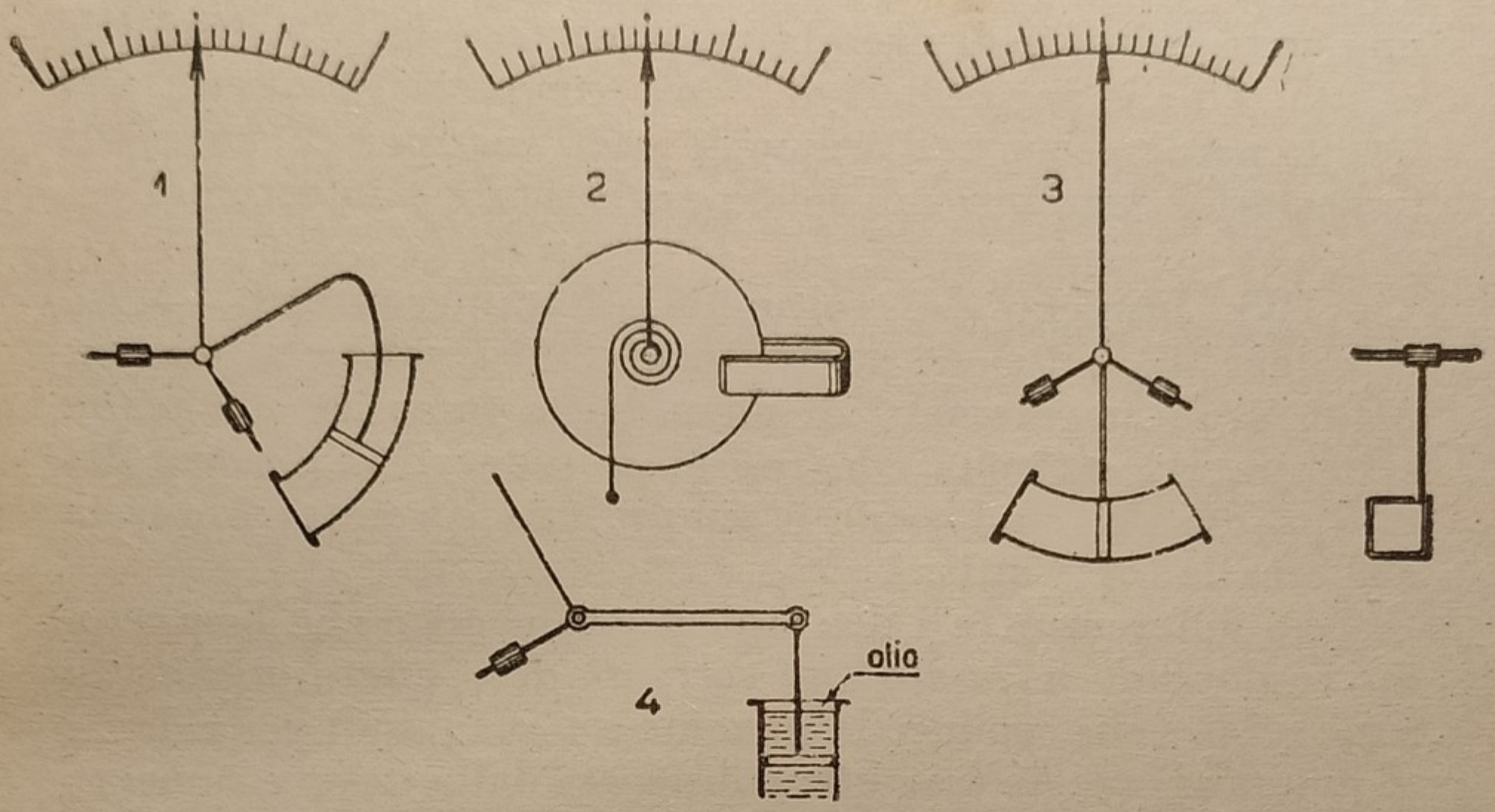


Fig 171 - Sistemi diversi di smorzatori delle oscillazioni negli strumenti di misura.

Negli strumenti più grossi (registratori) lo spegnimento delle oscillazioni è ottenuto con stantuffi che si muovono dentro ad un cilindro pieno di olio o di glicerina. Gli strumenti muniti di smorzatori delle oscillazioni si dicono *aperiodici*.

Si dice *portata* di un istrumento il valore massimo della grandezza che può misurare; essa è determinata dal prodotto del numero delle divisioni per il valore che ha ciascuna divisione e che si chiama la *costante* dell'apparecchio.

Per quanta cura si abbia di eliminare gli attriti dei perni degli equipaggi non è possibile ridurli a zero; perciò in principio scala per spostare l'equipaggio dalla posizione di riposo, e cioè l'ago dallo zero, bisogna spendere una certa quantità di energia, ciò che è a tutto danno dell'esattezza degli istrumenti. Infatti in tutti gli strumenti l'ago non ritorna mai dopo una incursione alla posizione di zero esattamente ma rimane un po' indietro (*scarto*). Le prime divisioni della scala sono quindi poco attendibili per l'influenza dell'attrito dei perni; negli strumenti comuni da quadro le indicazioni non hanno sufficiente esattezza se non a 1/3, a 1/4 dell'ampiezza della scala.

Tutti gli apparecchi di misura consumano o dissipano

una certa quantità di energia rappresentata dalle perdite per effetto Joule, e per isteresi del ferro, correnti di Foucault ecc. Queste perdite sono nell'ordine di pochi watt per gli strumenti indicatori e maggiori per quelli registratori e integratori.

105. Impiego dei voltmetri ed amperometri. — Ad eccezione dei voltmetri elettrostatici tutti i voltmetri sono in realtà degli amperometri di piccolissima intensità con molte spire in serie talvolta con resistenze notevoli. La causa del movimento dell'equipaggio è sempre una corrente; è questa che crea la forza attiva.

La differenza fra i due tipi di strumenti è che l'*amperometro dovendo misurare una corrente deve essere inserito in serie* sul filo che conduce la corrente stessa; quindi per ridurre al minimo l'energia assorbita o dissipata dallo stesso strumento il suo circuito interno è costituito da filo corto e grosso. (Fig. 172). Il *voltmetro invece dovendo misurare la differenza di*

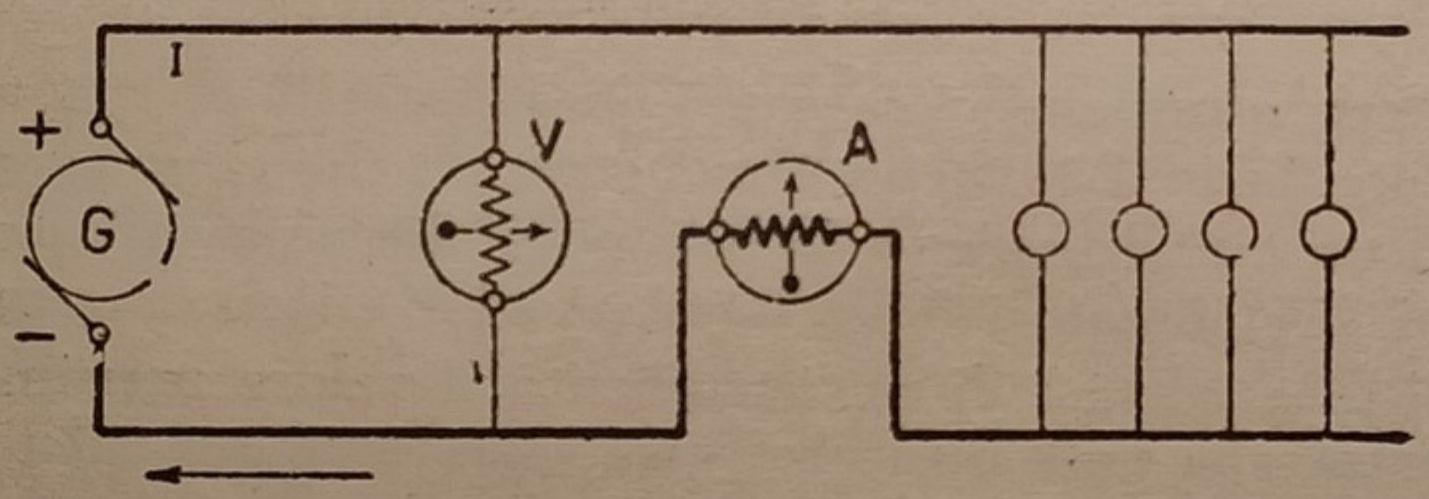


Fig. 172 - Inserzione di voltmetro e amperometro in un circuito.

potenziale fra due fili, deve essere messo in derivazione fra i medesimi; ma per ridurre al minimo la corrente *i* derivata e l'energia dissipata dall'istrumento si forma il circuito interno con una forte resistenza e cioè si adopera filo sottile e lungo, avente un coefficiente di temperatura quasi zero.

Un voltmetro ed un amperometro elettromagnetici cogli stessi precisi equipaggi mobili hanno la stessa ampiezza di scala se la bobina o rocchetto fisso ha lo stesso numero di ampère-spire; ma quella del voltmetro sarà di filo sottile e con moltissime spire; quella dell'amperometro di poche spire di filo grosso.

Si usano molto dei voltmetri portatili a due o tre scale per esempio 10-20-50 Volt, 100-200 V., 50-100-150 V. ecc. Que-

sti voltmetri portano diversi morsetti contrassegnati. Talvolta però lo stesso voltmetro ha una scala unica e per adattarlo a misure di voltaggi più elevati si adattano in serie esternamente delle resistenze pure in scatole portatili. Vediamo di sapere il loro valore. Inserendo esternamente una resistenza R pari alla resistenza *r* interna dell'istrumento (fig. 173) l'intensità *i* diventa la metà e le indicazioni del voltmetro, per avere la tensione E giusta, dovranno moltiplicarsi per 2.

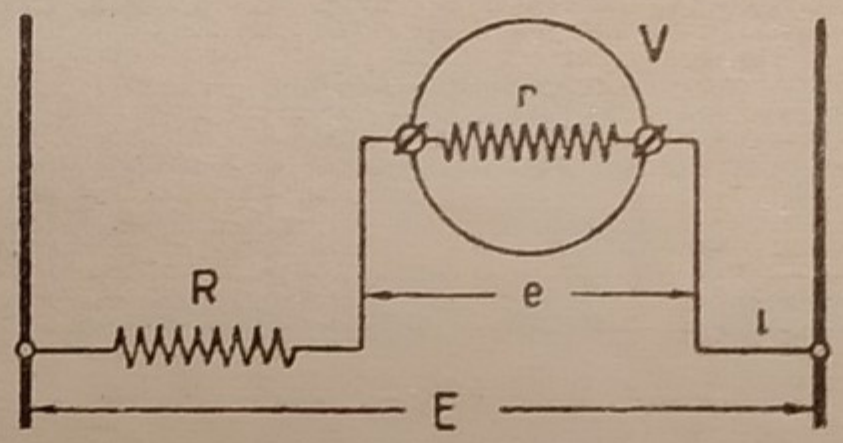


Fig. 173 . Voltmetro con resistenza ausiliaria in serie.

Se R = 2*r* la corrente *i* diventa 1/3 e le letture si devono moltiplicare per 3 ecc.

Se R = 9*r* l'intensità *i* diventa 1/10 e quindi il voltmetro può servire per una tensione 10 volte maggiore perchè le letture si devono moltiplicare per 10.

In generale se si aggiunge ad un voltmetro una resistenza R esterna, il voltaggio effettivo si avrà moltiplicando le letture per:

$$\frac{R + r}{r} \text{ e cioè } E = e\left(\frac{R + r}{r}\right)$$

Ovverosia: si può impiegare un voltmetro con resistenza *r* interna e di voltaggio *e* per un voltaggio maggiore E mettendo in serie una resistenza R di valore uguale od approssimativo:

$$\left(\frac{E}{e} - I\right) r$$

In ogni caso la lettura, per avere il vero valore del voltaggio, si ottiene moltiplicando la costante dell'istrumento per il coefficiente della formola precedente.

Le stesse regole che abbiamo esposte pei voltmetri valgono

anche pei circuiti voltmetrici dei wattmetri quando si vogliono adattare a tensioni più alte di quelle naturali dell'istrumento.

Anche gli amperometri portatili si fanno a più scale (per esempio 10-20 Amp.; 25-50-100 Amp. ecc.) mediante applicazione di più morsetti. Ma si possono avere dai costruttori degli amperometri a scala unica che possono adoperarsi per correnti più intense adattando in derivazione fra i morsetti una resistenza piccola detta *shunt*. (Fig. 174).

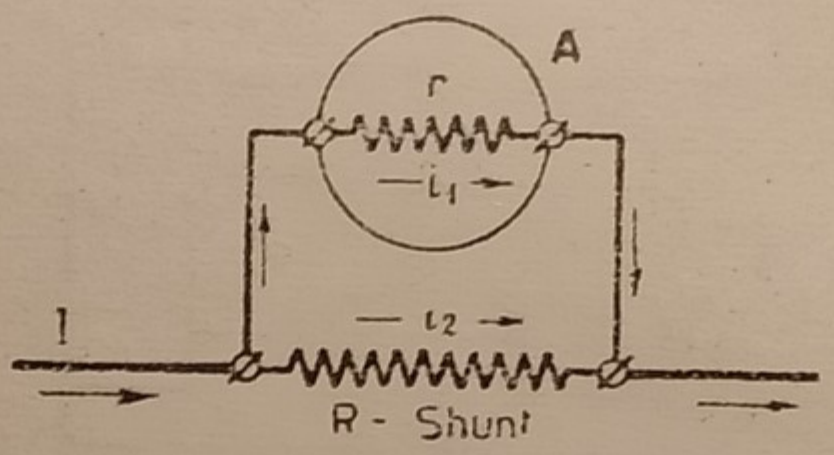


Fig. 174 - Amperometro con shunt.

Sappiamo che quando vi sono due resistenze in parallelo le intensità si dividono in ragione inversa delle resistenze:

$$i_1 : i_2 = R : r \qquad \text{dove} \qquad i_2 = I - i_1$$

Da questa proporzione, facendo la sostituzione del valore di *i*, si arriva a questa formola:

$$I = i_1 \left(\frac{r + R}{R}\right)$$

la quale esprime con l'intensità nel circuito da misurare si ottiene moltiplicando le letture dell'amperometro per il rapporto $\frac{r + R}{R}$.

Generalmente i shunt si fanno con lamine di materiali di media resistenza ohmica di 1/9, 1/99, 1/999 ecc. di *r*; in questi casi le letture si moltiplicano rispettivamente per 10, 100, 1000, ecc.

L'applicazione delle resistenze ausiliari *ai voltmetri* si può fare anche per corrente alternata purchè le resistenze non abbiano sensibile selfinduzione e cioè siano formate da filo sottile ad alta resistività avvolto su telaietti di legno ed escludendo qualsiasi nucleo di ferro.

Invece l'applicazione di shunt agli *amperometri* per misure a corrente alternata e al circuito amperometrico dei wattmetri è da escludersi perchè darebbe luogo a gravi errori. Infatti le due correnti derivate una nell'amperometro e l'altra nel shunt, non si suddividono in ragione inversa delle rispettive resistenze ohmiche, ma in ragione delle rispettive impedenze. Quindi misure con shunt e con strumenti su circuiti a c. c., non possono valere su circuiti a c. a.

Per misurare tensioni di pochi volt su circuiti di qualche ampèr o frazione di amp. (Misure di pile) si devono usare voltmetri a grande resistenza e che consumino frazioni piccolissime di ampèr, altrimenti la corrente derivata altera le condizioni del circuito e fa abbassare la tensione.

La stessa osservazione vale per i wattmetri per la misura di pochi watt.

106. Galvanometri e galvanoscopi. — I primi sono strumenti che servono a *misurare* le piccolissime intensità; i secondi soltanto a *rivelarle*.

I galvanometri sono quindi apparecchi di precisione per laboratori; i secondi sono meno esatti e meno sensibili, ma sono indispensabili agli operai elettricisti per verificare la continuità dei circuiti.

Il più semplice galvanometro ed il più antico è costituito da un ago magnetico sospeso dentro ad una bobina rettangolare di filo percorso dalla corrente. (Fig. 175). Per adoperare

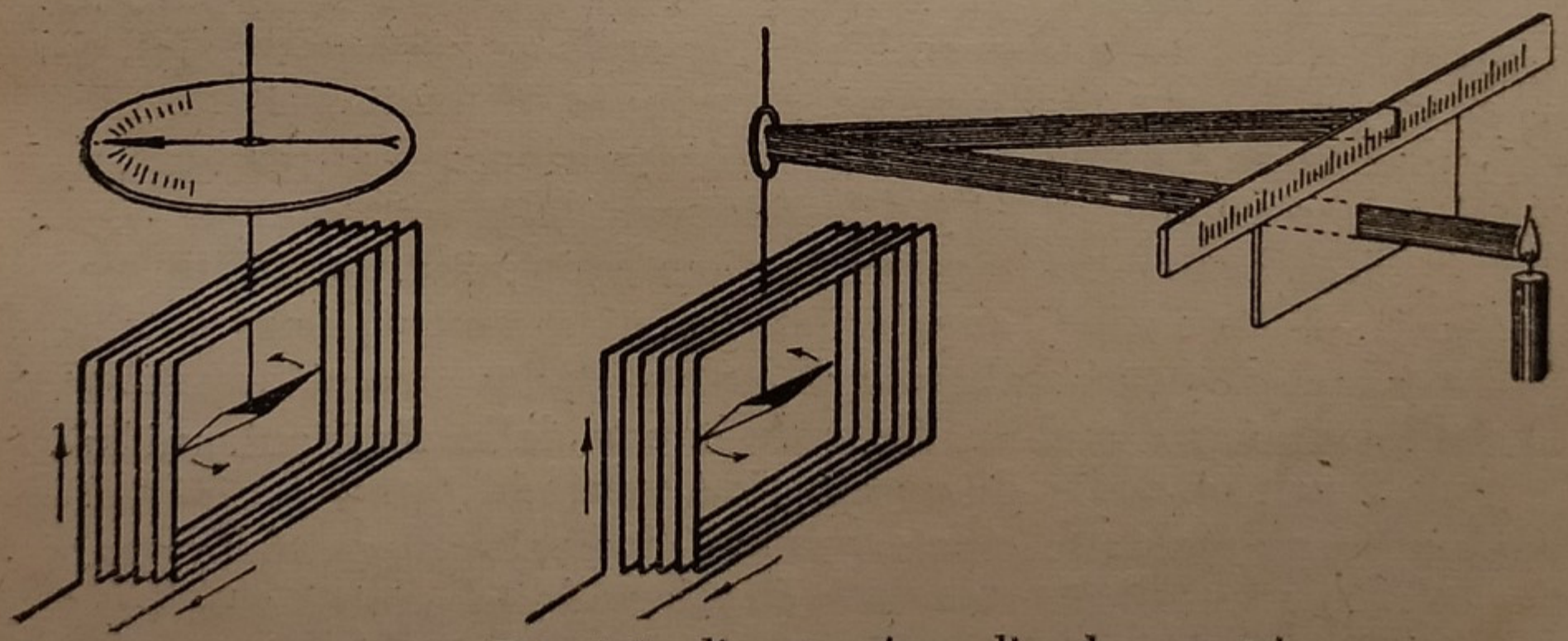


Fig. 175 . Principio di costruzione di galvanometri ad ago semplice ed a riflessione.

i galvanometri semplici prima di mettere la corrente si orientano in modo che l'ago nella sua posizione normale N-S si trovi in posizione perpendicolare all'asse della bobina; lanciando la corrente il campo magnetico fa ruotare l'ago di un certo angolo vincendo la forza di torsione del filo di sospensione. L'angolo di deviazione si misura per mezzo di quadranti sopra o sotto all'ago o dalla deviazione di un raggio riflesso da uno specchietto posto sul filo di sospensione.

Per aumentare la coppia nei galvanometri ad ago magnetico e quindi la loro sensibilità, in alcuni modelli si sono sostituiti agli aghi dei pezzi magnetici più pesanti; si formarono le bobine fisse con un grandissimo numero di spire di filo fino ecc. ecc.

Uno dei modelli più diffuso di galvanometri è quello a *magnete fisso o Desprez d'Arsonval*. Esso è composto di un magnete fisso a ferro di cavallo con le due estremità munite di espansioni polari di ferro o d'acciaio, come nella fig. 176.

Tra le branche vi è un nucleo cilindrico di ferro disposto in modo da lasciare, fra esso e le espansioni un intercapedine d'aria di qualche millimetro di spessore. In questo interferro si forma un energico campo magnetico uniforme ed in esso può ruotare una piccola bobina rettangolare di filo di rame sottilissimo con copertura isolante; le spire sono agglomerate con una vernice isolante. La bobinetta è sospesa ad un filo e tesa per disotto da uno o due fili; due piccole molle di metallo antimagnetico portano la corrente alla bobina. La bobina porta un indice che si muove su un quadrante; oppure al filo è attaccato uno specchietto, quando si vuol usare del sistema di lettura a riflessione. La coppia di torsione della piccola bobina è data dalla azione di repulsione od attrazione fra il campo magnetico ed il filo percorso dalla corrente.

I galvanometri a magnete fisso sono molto sensibili, robusti; le deviazioni angolari di questi strumenti sono perfettamente proporzionali alla intensità della corrente passante nell'equipaggio mobile. Le scale hanno delle divisioni uniformi. I galvanometri di questo tipo vengono *tarati* e cioè sottoposti a prove atte a determinare l'intensità di corrente equivalente ad 1° di spostamento angolare dello equipaggio.

La taratura si fa in diversi modi; uno dei più usati consiste nel mettere in serie col galvanometro una grande resisten-

za di filo fino di grandezza conosciuta (da 10 a 100 mila ohm) ed una *pila campione* cioè una pila di cui si conosce la f. e. m. Così conoscendosi la resistenza inserita, la resistenza interna della pila e quella del galvanometro si possono calcolare gli ampère (anzi frazioni di ampère piccolissime). Si leg-

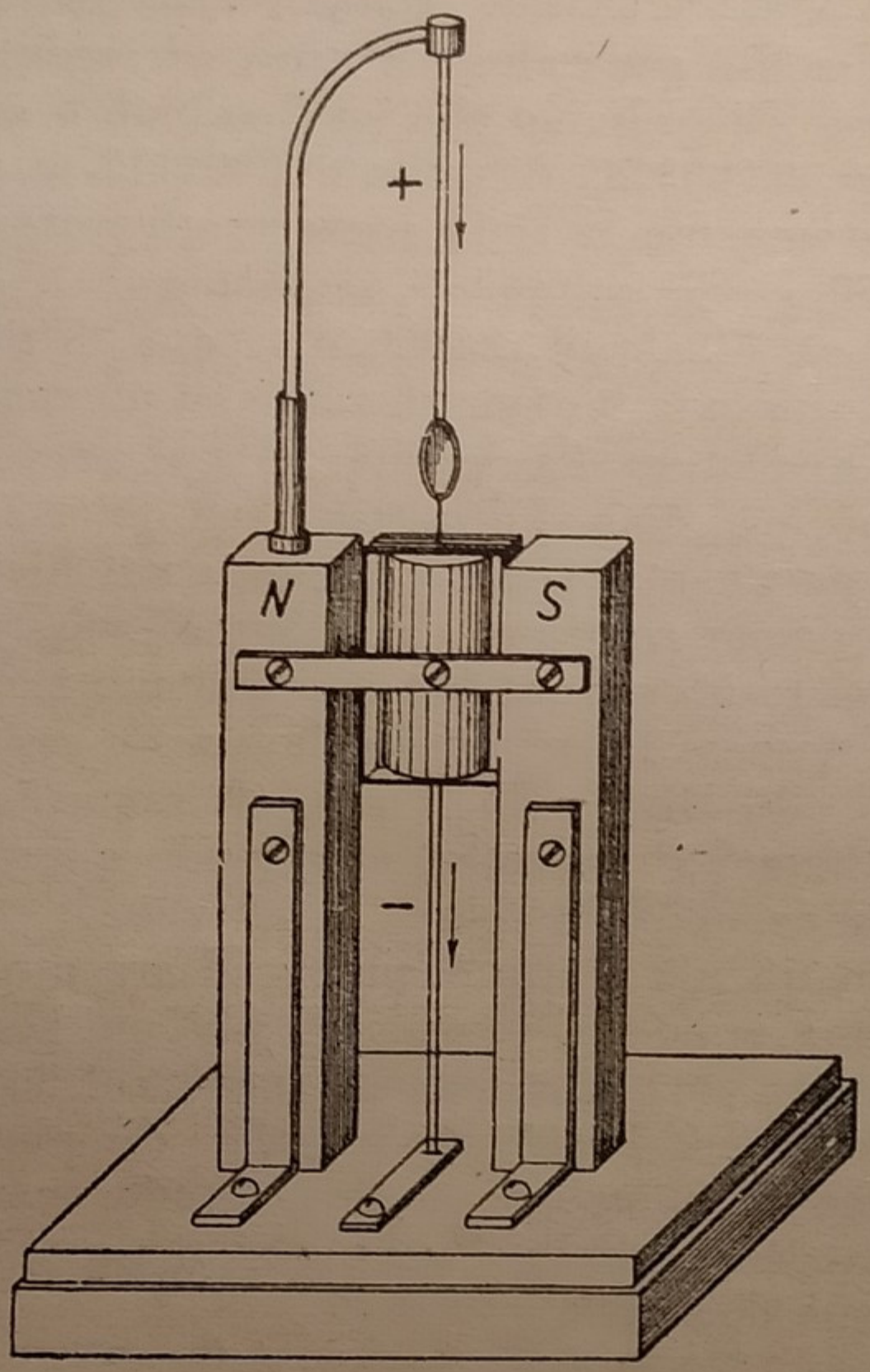


Fig. 176 - Principio di costruzione dei galvanometri a magnete fisso Desprez e d'Arsonval con sospensione bifilare.

ge l'angolo di derivazione dell'equipaggio e quindi, essendo le deviazioni proporzionali agli ampères, si può sapere a quanto corrisponde un grado di deviazione.

Un altro sistema di taratura del galvanometro consiste nell'inserire l'istrumento in derivazione sopra una piccola resistenza di valore noto attraverso alla quale si fa passare una corrente costante di parecchi ampère data da una batteria di

accumulatori. L'intensità della corrente viene misurata con amperometri di precisione portatili tipo Weston oppure con un voltametro nel modo che segue.

107. Misura dell'intensità di corrente coi voltametri. — I voltametri sono fondati sulla deposizione elettrolitica dei metalli, generalmente rame ed argento, dalle loro soluzioni saline. Ricordiamo che un Coulomb o ampère-secondo deposita gr. 0,0003285 di rame o 0,001118 di argento. Per misurare una corrente la si fa passare attraverso ad una soluzione di 150 gr. di solfato di rame puro; 10 gr. di acido solforico; 50 gr. di alcool e 1000 di acqua distillata, fra un anodo formato da una lastrina di rame ed un catodo di lastra di piombo o di platino. La densità della corrente si tiene minore di 3 amp. per dmq. Le lastrine ben deterse vengono accuratamente pesate e poi messe a posto nel bicchiere. Si fa passare la corrente continua da misurare mantenendola costante con una resistenza esterna e si contano i minuti od ore di passaggio. Sospesa la corrente si lavano, si essicano e si pesano gli elettrodi. Dividendo il peso di rame depositato per 0,0003285 si hanno i coulomb e dividendo questi per minuti secondi si ottengono gli ampères di intensità.

Il voltametro più esatto è quello ad argento nel quale il catodo è formato da una capsula di platino, l'anodo da una lamina d'argento e la soluzione di acqua col 30% di nitrato d'argento purissimo. Invece di capsula di platino si può impiegare una di porcellana o vetro avente anodo e catodo d'argento. La densità della corrente si tiene di 3 Amp. per decm. quadrato di catodo.

108. Verifica degli amperometri e dei voltometri. — La verifica o taratura degli amperometri si fa mettendo in serie coll'apparecchio da controllare un *amperometro campione*. La variazione degli amperès si ottiene con una resistenza regolatrice in serie cogli apparecchi. Invece di amperometri campioni si possono adoperare galvanometri con shunt di cui si conoscano le esatte resistenze. Se gli amperometri sono elettromagnetici si può verificare l'effetto che ha l'isteresi sulla piccola armatura di ferro dell'equipaggio mo-

bile facendo la taratura con corrente prima crescente e poi decrescente od invertendo la corrente. (Vedi fig. 172 *a*).

La verifica dei voltmetri si fa mettendoli in parallelo con voltmetri campioni e variando la tensione per mezzo di resistenze o impiegando piccole dinamo di qualche ampère e di tensione variabile entro grandi limiti. Si adoperano batterie di piccolissimi accumulatori, a due o quattro placche, messi in serie in gran numero. Vedi fig. 177 *b*).

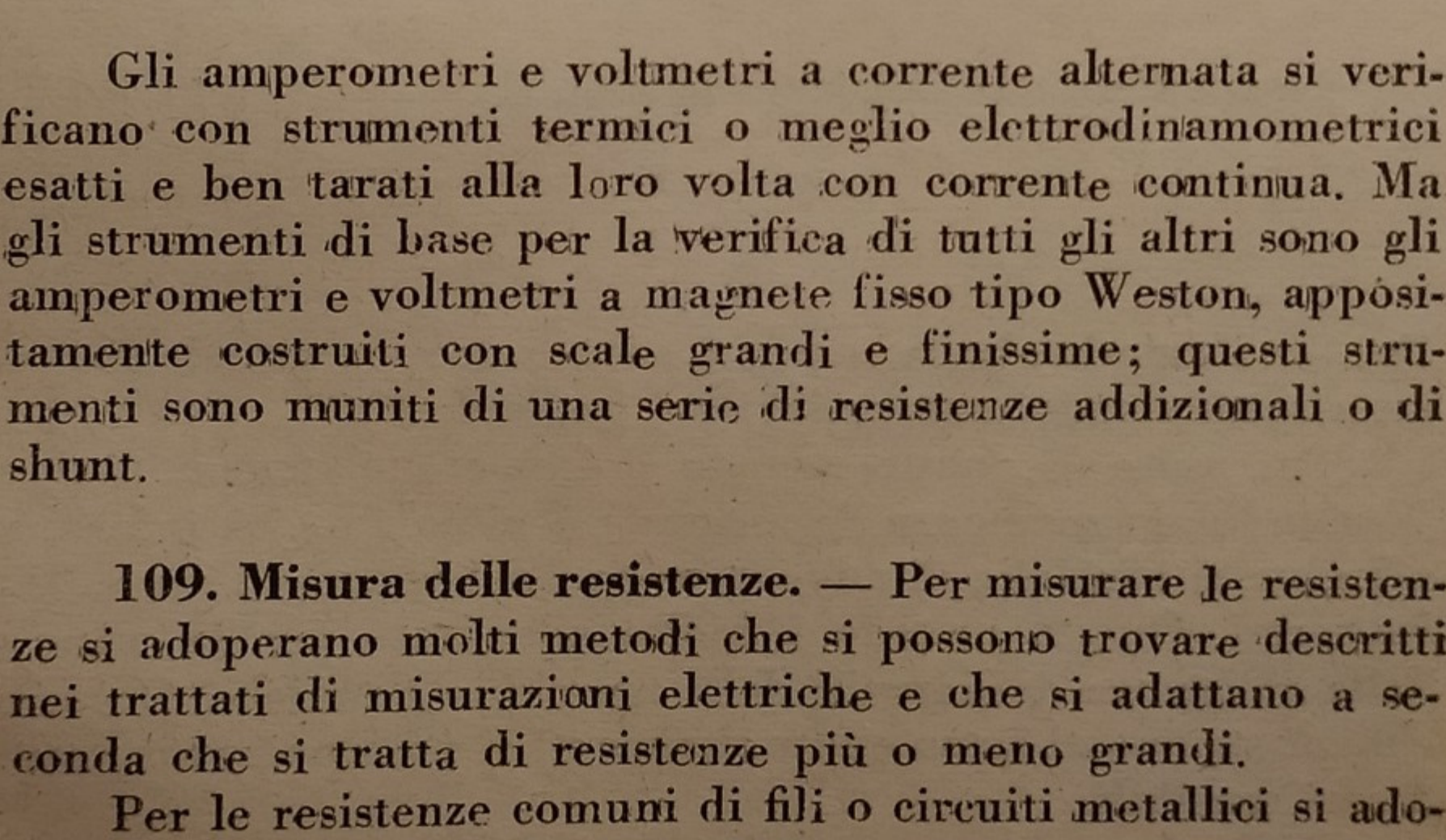


Fig. 177 *a-b* - a) Schema del dispositivo per la verifica di un amperometro.
b) Schema per la verifica di un voltmetro.

Gli amperometri e voltmetri a corrente alternata si verificano con strumenti termici o meglio elettrodinamometrici esatti e ben tarati alla loro volta con corrente continua. Ma gli strumenti di base per la verifica di tutti gli altri sono gli amperometri e voltmetri a magnete fisso tipo Weston, appositamente costruiti con scale grandi e finissime; questi strumenti sono muniti di una serie di resistenze addizionali o di shunt.

109. Misura delle resistenze. — Per misurare le resistenze si adoperano molti metodi che si possono trovare descritti nei trattati di misurazioni elettriche e che si adattano a seconda che si tratta di resistenze più o meno grandi.

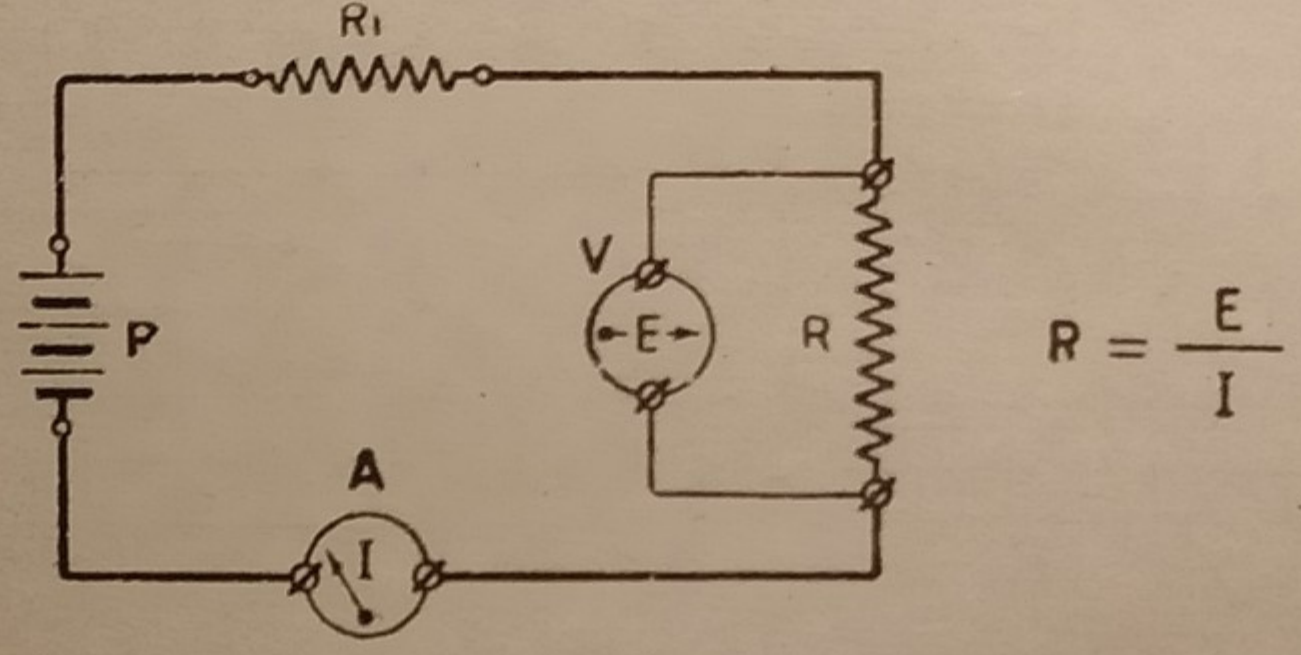
Per le resistenze comuni di fili o circuiti metallici si adoperano specialmente tre metodi:

1.° Indiretto con misurazione di E e di I.

2.° Per sostituzione.

3.° Col ponte di Wheatstone e analoghi.

Metodo indiretto. — Con questo metodo, per misurare la resistenza R di un filo, di un circuito di una macchina, di una linea ecc., si fa passare una *corrente continua* adatta e con un amperometro ed un voltmetro si misura l'intensità I e la f. e. m. E alle estremità della resistenza da misurare R. (Fig. 178).



$$R = \frac{E}{I}$$

Fig. 178 - Misura di una resistenza mediante voltmetro e amperometro colla corrente continua.

La resistenza R sarà data in ohm da

$$R = \frac{E}{I}$$

Per far in modo che la corrente sia non troppo grande si può inserire una resistenza variabile o graduale R_1.

Per usare di questo metodo si adoperano strumenti tipo Weston; se la resistenza da misurare è piccola e cioè inferiore a 1 ohm si consiglia di adoperare non dei voltmetri ma *millivoltmetri*. Questo metodo è molto adoperato per la misura della resistenza dei circuiti delle macchine elettriche. Occorre che gli strumenti siano esatti altrimenti si possono commettere errori sensibili.

Dalla formola sopra indicata si deduce se E fosse costante, si potrebbe sull'amperometro segnare per ogni divisione di scala il valore E: I ossia la resistenza in ohm. Cioè l'ampe-

rometro o galvanometro potrebbe indicare direttamente la resistenza. Su questo principio sono costruiti gli *ohmmetri* che sono apparecchi portatili molto diffusi che servono per misurare la resistenza di isolamento dei circuiti e che di solito è grandissima, nell'ordine da qualche migliaio di ohm a parecchi megaohm. Questi apparecchi contengono oltre al galvanometro un gruppo di pile a secco, oppure una dinamo magnetoelettrica di un centinaio di volt; in altri si adopera la tensione degli impianti a 100 o 110 V.

Metodo per sostituzione. — La resistenza R. da misusare si inserisce in serie in un circuito chiuso formato dalla stessa resistenza, da un galvanometro od amperometro e da una pila costante. Si legge la deviazione del galvanometro e quindi per tentativi, si sostituisce, alla resistenza incognita R, delle resistenze conosciute finchè la deviazione del galvanometro è ridotta a quella di prima. E' un metodo applicabile per misure di forti resistenze per esempio per le bobine delle cassette di resistenza.

Metodo del ponte. — Questo metodo è il più diffuso ed il più preciso e *serve per le misure di resistenza nei limiti di* 1 *Ohm a* 100 *mila hom circa.* Sotto a 0,1 ohm il metodo non da misure esatte.

Il metodo consiste in una combinazione di quattro resistenze r_1 r_2 r_3 r_4 di una pila P e di un galvanometro G. (Figura 179).

Le quattro resistenze vengono accoppiate in forma di parallelogramma nel modo indicato dalla figura ABCD. Le due diagonali sono formate dal galvanometro e dalla pila (*generalmente con due elementi*). Nei circuiti di pila e del galvanometro sono inscritti dei tasti.

Così disposte le cose si regolano le resistenze in modo che il galvanometro segni zero. Se il galvanometro, a tasto abbassato, segna zero è segno che i punti A e D sono allo stesso potenziale. Indicando con i_1 e i_2 le due correnti che passano nei due rami superiore ed inferiore del ponte si avrà per legge di Ohm (E = RI):

$$r_1 i_1 = r_3 i_2 \quad \text{(cioè la f. e. m. B A = B D)}$$
$$r_2 i_1 = r_4 i_2 \quad \text{(cioè la f. e. m. A C = D C)}$$

Dividendo le due eguaglianze si ha:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}$$

da cui si cava che:

$$r_4 = \frac{r_2 \times r_3}{r_1} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right) r_3$$

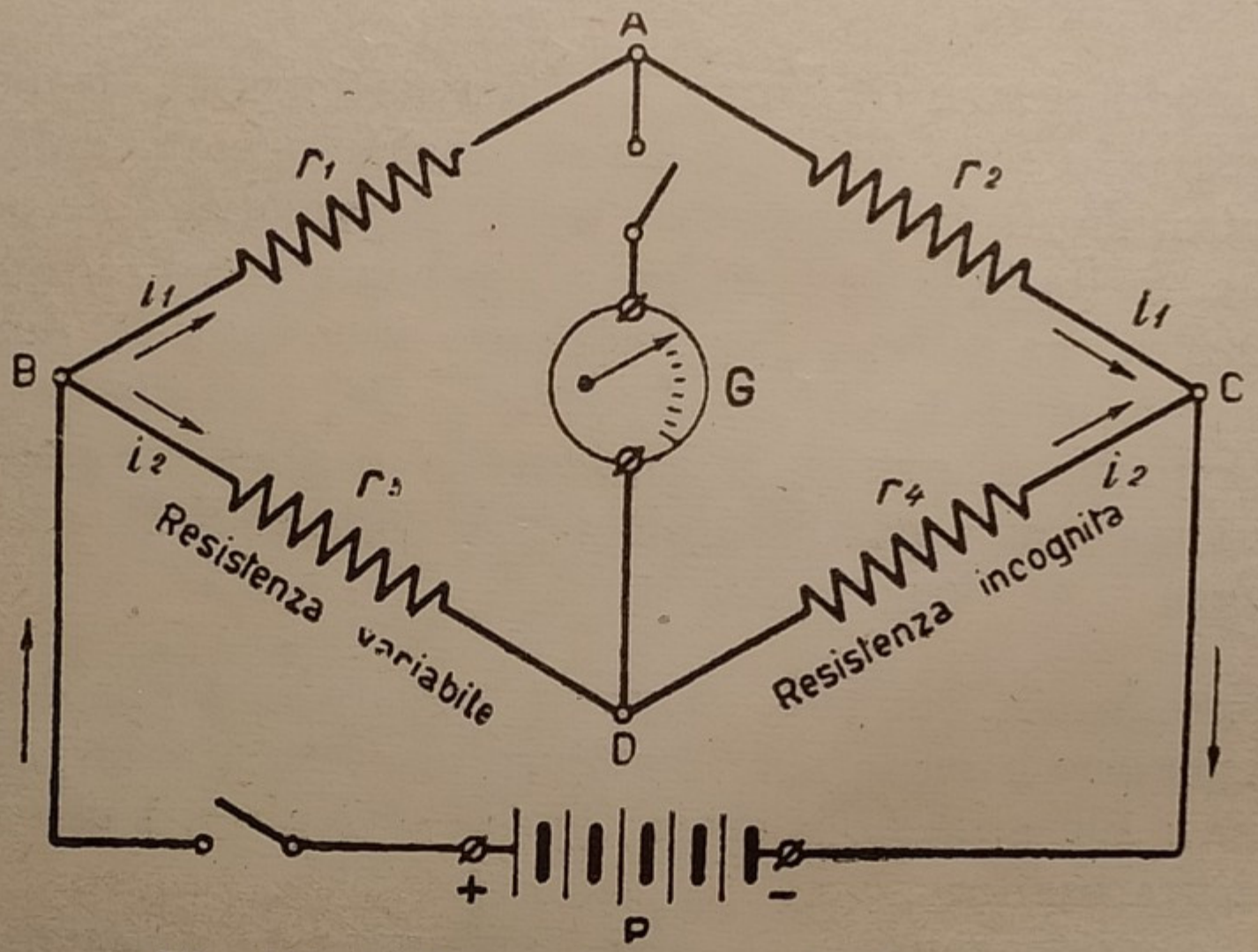


Fig. 179 . Schema del ponte di Wheastone.

La r_4 *si ritiene la resistenza incognita da misurare.* Le r_2 e r_1 si compongono con due resistenze note in modo che il rapporto $r_2 : r_1 = 0{,}1 - 1 - 10 - 100 - 1000$.

La r_3 si forma con una cassetta di resistenze variabili in modo che si possono aumentare o diminuire per mezzo di spine e caviglie finchè il galvanometro segna zero. Così disposte le cose la resistenza incognita r_4 sarà data da:

$r_4 = 0{,}1\ r_1$ oppure $r_4 = r_1$ oppure $r_4 = 10\ r_1$ oppure $r_4 = 100\ r_1$

Per comodità di impiego le tre resistenze r_1 r_2 r_3 vengono riunite generalmente in una sola cassetta e disposte secondo la figura 180. Le resistenze nella cassetta sono disposte in modo che estraendo una caviglia si inserisce esattamente la resistenza segnata sul coperchio.

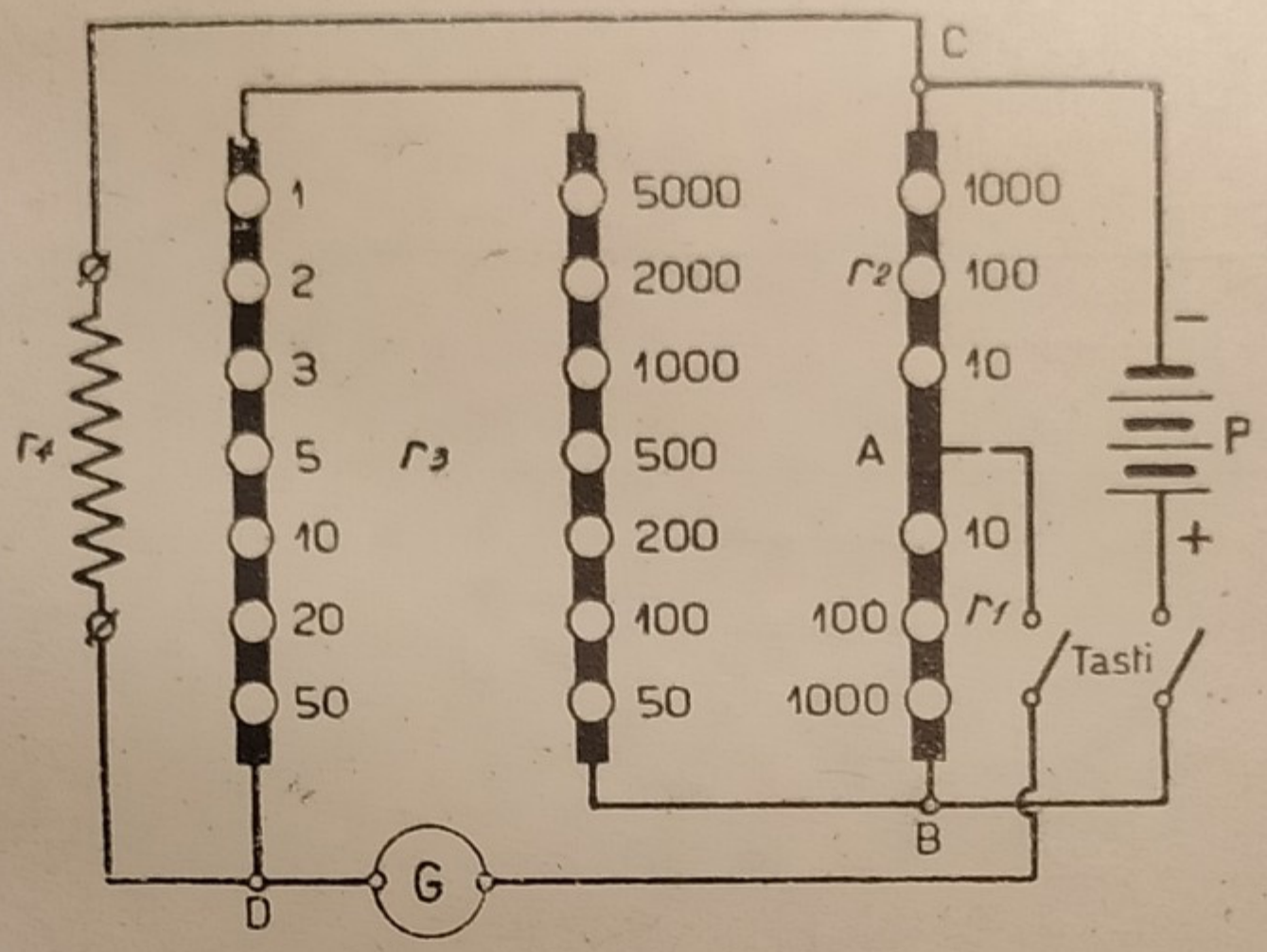


Fig. 180 - Disposizione usuale delle cassette di resistenza uso ponte.

Per usare del ponte di Wheastone si procede in questo modo: si estraggono le spine di resistenza r_1 e r_2 in modo che il rapporto $r_2 : r_1 = 1$; ma se l'operatore intuisce che la resistenza incognita r_4 è fra 100 e 10000 si può fare $r_2 : r_1 = 1/10$ *oppure* 1/100; se invece si intuisce che la resistenza r_4 fra 0,1 e 1, allora si può fare $r_2 : r_1 = 10$ oppure $= 100$. In caso che non si conosca nulla si tenta $r_2 : r_1 = 1$. Poi si estraggono le spine di r_3 aumentando successivamente di valore; ogni volta si abbassa prima il tasto della pila e poi del galvanometro e si guarda se la deviazione aumenta o diminuisce e poi cambia segno; ciò significa che si è oltrepassato il giusto valore. Si continua nei tentativi finchè abbassando i tasti l'ago rimane assolutamente fermo. Nell'interrompere bisogna aprire prima il tasto del galvanometro poi quello della pila.

Una semplificazione del ponte di Wheastone consiste nel così detto *ponte a filo* o ponte metrico. Sopra una tavoletta di legno si dispone un filo metallico (nichelina, argentana, nichel-cromo del diametro di 2 a 3 decimi di mm). lungo un metro fra due serrafili. (Fig. 181). Parallelo al filo A D vi è una graduazione in cm. e mm.

Il filo graduato e teso si dispone con uno o due elementi di pila, un galvanometro e una cassetta di resistenza confor-

memente alla fig. 181. Sul filo si fa correre un corsoio attaccato alla pila finchè il galvanometro segna zero.

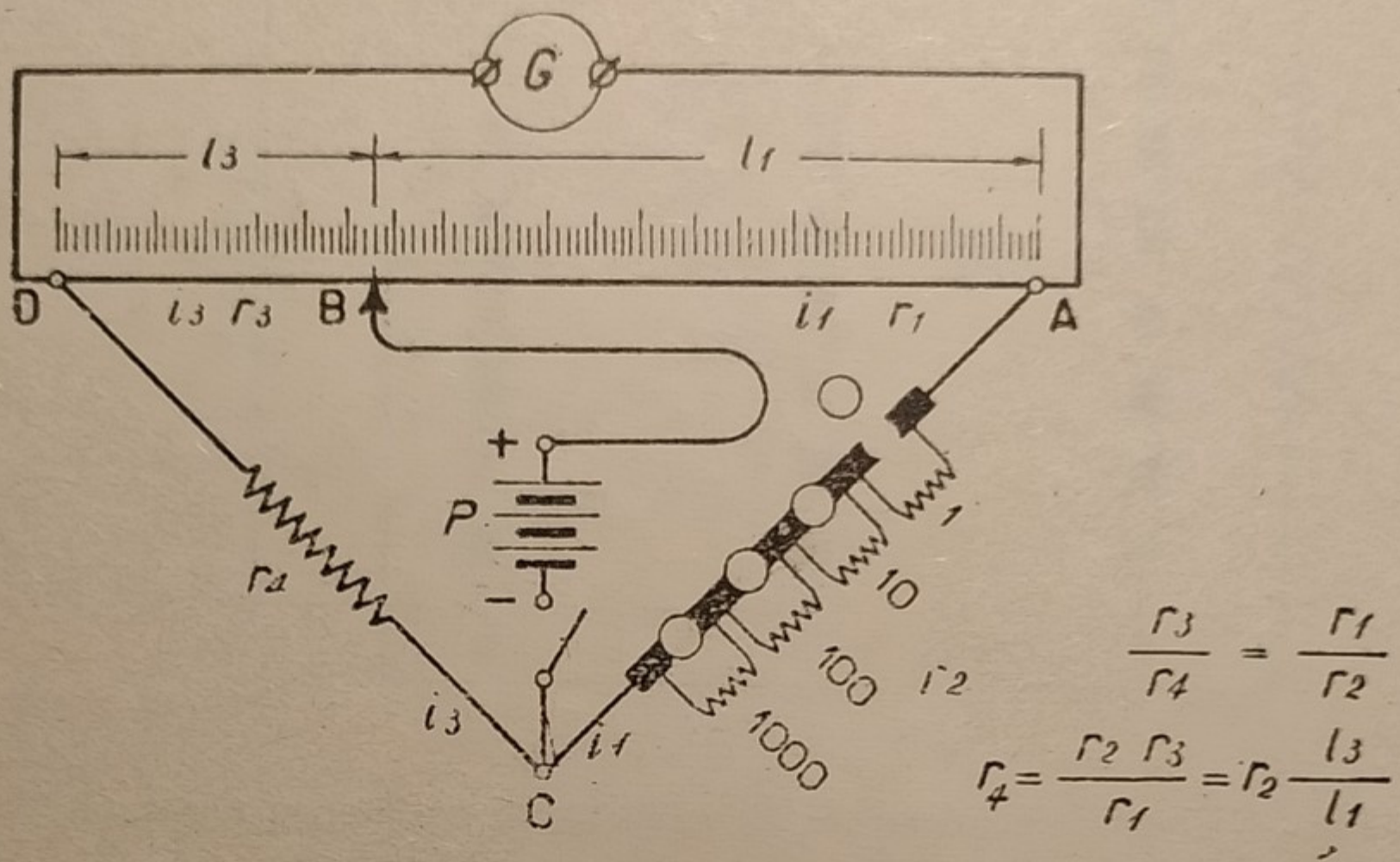


Fig. 181 - Tipo semplice di ponte a filo teso.

La massima precisione si ottiene quando le quattro resistenze r_1 r_2 r_3 r_4 sono prossime fra loro od uguali nel loro valore. Bisogna usare la precauzione di chiudere prima il tasto della batteria poi quello del galvanometro e inversamente quando si aprono i circuiti e ciò per impedire extra correnti nel galvanometro.

110. Misure delle piccole resistenze - ponte doppio di Thomson. — Come si è detto, col ponte di Wheastone non si possono misurare con sufficiente esattezza delle resistenze inferiori a 0,1 ohm. Col doppio ponte di Thomson si possono misurare resistenze di fili, sbarre tra un ohm e un milionesimo di ohm. Lo schema è dato dalla fig. 182.

In detta figura si osserva che nella parte inferiore sono messe in serie: 1.° la resistenza X da misurare serrata tra due coltelli 1 e 2; 2.° una resistenza R campione formata da una sbarra di manganina con contatto a corsoio e graduazione; 3.° una batteria B di due elementi d'accumulatori; 4.° un amperometro A, una resistenza r a corsoio e un tasto. In derivazione fra i punti 1 e 2, 3 e 4, vi sono 4 resistenze r_1 r_2 r_3 r_4 ed un galvanometro G con tasto. Le 4 resistenze r_1 r_2 ecc. sono

formate da cassette uguali contenenti ciascuna resistenze di 10 - 100 - 1000 ohm munite di spine, come quelle del ponte di Wheastone. Per la misura si procede così:

La resistenza da misurare X sotto forma di filo grosso, di sbarra, si serra fra due morsetti muniti dei coltelli 1 e 2; si dispongono le resistenze in modo che sia $r_1 = r_3$ e $r_2 = r_4$;

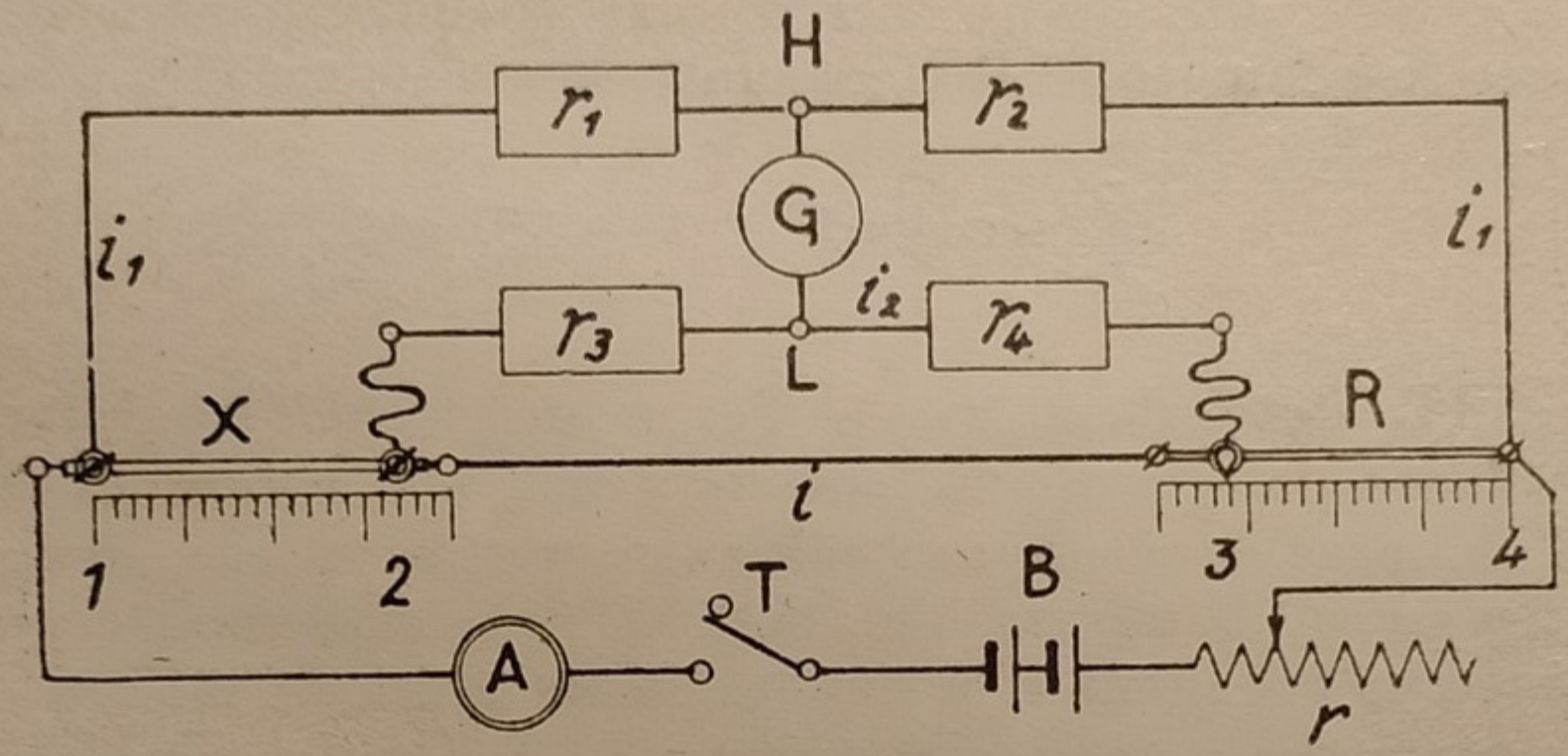


Fig. 182 - Schema delle connessioni di un ponte doppio di Thomson.

poi si regola colla resistenza r l'intensità nello amperometro in modo che non sia eccessiva. Infine si fa scorrere il corsoio 3 della resistenza campione R in modo da annullare la deviazione del galvanometro G. In questo caso i punti H e L sono allo stesso potenziale.

Le resistenze r_1 e r_2 sono percorse da una corrente i_1; le resistenze r_3 e r_4 dalla i_2; resistenze X e R sono percorse dalla stessa corrente che chiameremo i. Ciò posto, applicando la legge di Ohm avremo:

$$i_1 r_1 = i X + i_2 r_3$$
$$i_1 r_2 = i R + i_2 r_4$$

Essendo $r_1 = r_3$ e $r_2 = r_4$ come abbiam detto di fare si ha:

$$i_1 r_1 = i X + i_2 r_1$$
$$i_1 r_2 = i R + i_2 r_2$$

ossia:

$$i X = r_1 (i_1 - i_2)$$
$$i R = r_2 (i_1 - i_2)$$

Dividendo membro a membro le due relazioni:

$$\frac{X}{R} = \frac{r_1}{r_2} \quad \text{da cui } X = R\,\frac{r_1}{r_2}$$

Dal che si deduce che se è X maggiore di R allora si regolano le resistenze in modo che $\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4} = \frac{1}{10}$, oppure $\frac{1}{100}$ se invece X è minore di R si regolano le resistenze in modo che

$\frac{r_1}{r_2}$ sia uguale a 10 — 100 ecc.

111. Potenziometri. — Per misurare nei laboratori di precisione delle tensioni (corrente continua) e fare ad esempio una precisa taratura di voltmetri, wattmetri, ecc. si ricorre a dispositivi di misurazione detti di *compensazione* o *potenziometrici* coi quali si assumono come unità di misura o di confronto delle *resistenze campioni* e *una pila campione*. Il principio generale è riassunto schematicamente nella fig. 183.

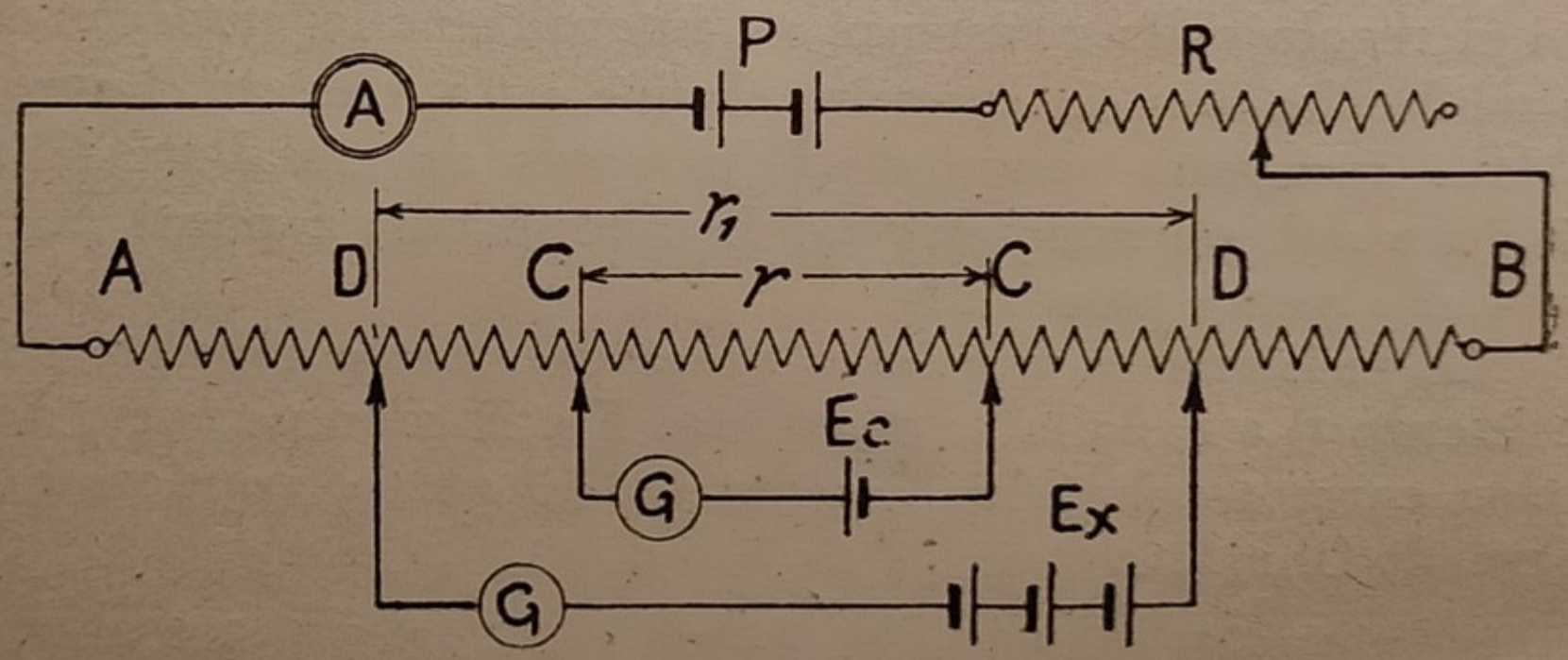


Fig. 183 - Schema delle connessioni di un potenziometro semplice.

Sia AB una resistenza variabile nota (filo calibrato, cassetta di resistenza a contatti e manubrio girevole, ecc.) fra 100 e 200 ohm. Questa resistenza si trova in serie con una pila P e con una *resistenza di regolazione* R, onde mantenere in determinati limiti la corrente *i* — generalmente di qualche decimo o centesimo di Ampère.

Fra i punti CC della *resistenza potenziometrica* AB si

deriva con due contatti un circuito contenente un galvanometro e una *pila campione* di f. e. m. Ec conosciuta. Si regola la resistenza r interclusa finchè il galvanometro segna zero; nel qual caso la f. e. m. Ec sarà uguale e contraria a $r \times i$.

Lasciando costante e invariata la corrente i, si sostituisce alla pila campione la f. e. m. Ex incognita e da misurare, regolando la resistenza interclusa fra i contatti in modo che in una certa posizione DD il galvanometro segna ancora zero. Sia r_1 la resistenza interclusa fra DD.

Avremo allora:

$$\frac{E_x}{E_c} = \frac{r_1}{r} \qquad \text{da cui } E_x = \frac{r_1}{r} E_c$$

Se l'elemento campione è per esempio una pila Weston al cadmio Ec = 1,0183 a 20°. Allora si può anche scegliere la resistenza r = 1,0183 nel qual caso si ha:

$$E_x = r_1$$

La sostituzione della f. e. m. Ec alla f. e. m. Ex si fa con un commutatore bipolare applicato all'apparecchio.

I potenziometri più impiegati sono quelli di Feussner, Raps, Campbell, Pasqualini, Weston ecc. La differenza di costruzione si basa sopratutto nel modo di regolare la resistenza potenziometrica AB in modo che riesca la più semplice e più fina possibile. Questi potenziometri possono servire direttamente a misurare delle differenze di potenziale fino a 1,5 - 1,8 volt. Per estendere le misurazioni a tensioni più alte Ea fino a centinaia e migliaia di volt, si applica in derivazione sui due fili che portano la tensione Ea una grande resistenza di filo fine e molto lungo nel modo indicato dalla figura 184 e si determina la tensione Ex sopra una piccola porzione della grande resistenza.

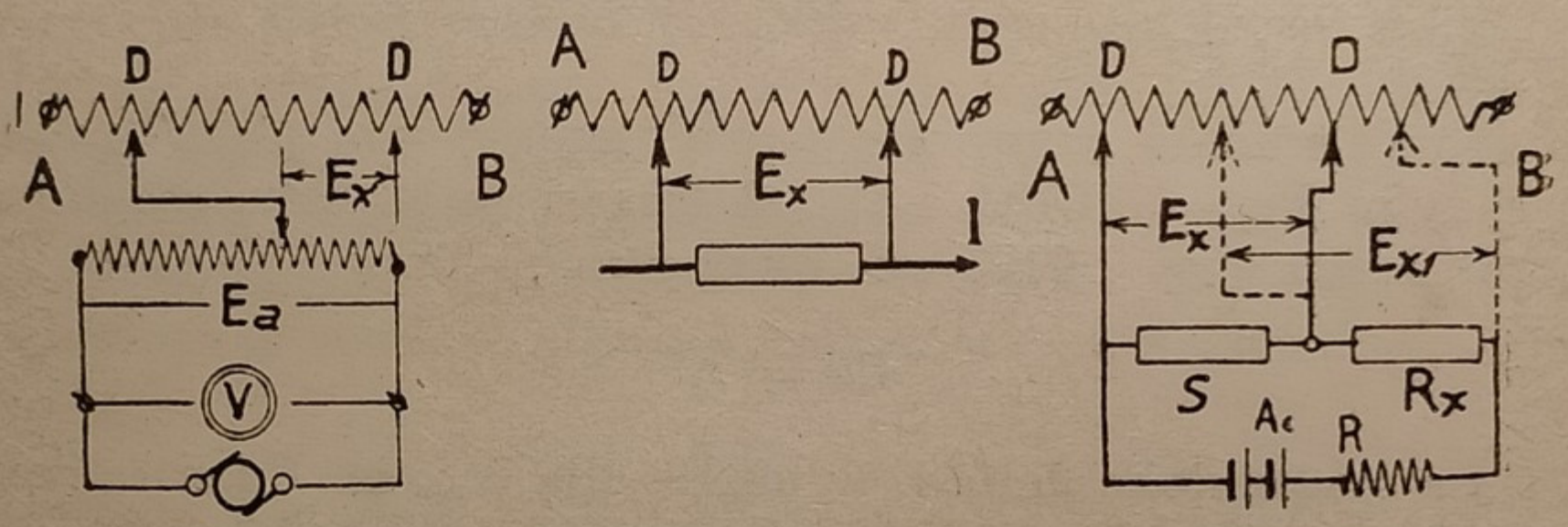
Queste forti resistenze si dicono anche riduttori di tensione.

Coi potenziometri si possono anche misurare le intensità facendo passare la corrente incognita I attraverso ad una piccola resistenza di valore noto (R). Allora misurando col potenziometro la f. e. m. Ex nel solito modo avremo che I = Ex : R.

La disposizione è indicata dalla fig. 185.

Infine col potenziometro si possono misurare piccole resistenze in questo modo. (Fig. 186). Si mettono in serie la resistenza Rx da misurare con una resistenza S di valore noto e con uno due elementi di accumulatore Ac, regolando la corrente con una resistenza qualunque R. Col solito metodo potenziometrico si misura la forza elettromotrice Ex ai capi della resistenza S nota e si deduce il valore di I. Quindi con un commutatore si misura la f. e. m. Ex_1 ai capi della resistenza incognita Rx senza alterare il valore di I allora sarà

$$R_x = \frac{E_{x\,1}}{I}.$$



Figg. 184 - 185 - 186
Applicazioni diverse del potenziometro.

Come si vede un potenziometro richiede accessori complementari se si vuol adoperare per misurare tensioni alte e resistenze. Prima di impiegare i potenziometri si deve verificare se la resistenza AB è suddivisa in modo uniforme.

Col potenziometro si possono far misure di reattanza e di capacità e si può anche adattarli per verifiche di f. e. m. alternative. Ma per questi dettagli, che richiederebbero lunghe spiegazioni, rimandiamo il lettore ai libri speciali sulle misurazioni elettriche.

Tutte le misure coi potenziometri si basano sull'uso di una pila campione ossia di una pila di cui si conosce la f. e. m. a circuito aperto colla più grande esattezza, come pure sull'uso di cassette di resistenza pure molto esatte.

Fra le pile campioni quella ora più diffusa è la Weston formata da un elettrodo di mercurio (+) e uno di cadmio (—). Come liquido eccitatore si adopera una soluzione satura

di solfato di cadmio e come depolarizzante del solfato mercurioso in cristalli. La f. e. m. di questa pila è di 1,0183 alla temperatura di 20°. Si costruiscono pile Weston con soluzione non satura ma che danno una f. e. m. costante al variare della temperatura fino a 25°. Ogni elemento viene spedito con certificato delle prove e del coefficiente di temperatura.

Nell'uso di questa pila non si deve mai scaricarla altrimenti la f. e. m. si abbassa notevolmente; essa deve servire sempre come campione di f. e. m. senza corrente e cioè come se fosse a circuito aperto.

112. Misura di potenza. - Wattmetro. — L'istrumento principale per la misura della potenza in watt consumata o prodotta da una macchina, da un circuito è il wattmetro. Quasi tutti i wattmetri impiegati nella pratica sono del *tipo elettrodinamico* e constano di una bobina fissa da inserirsi in serie sul circuito da misurare e di una bobina mobile da inserirsi in derivazione sullo stesso circuito. La bobina mobile ruota su due perni; due piccole molle servono da forza antagonista ed a portare la corrente. (Fig. 187).

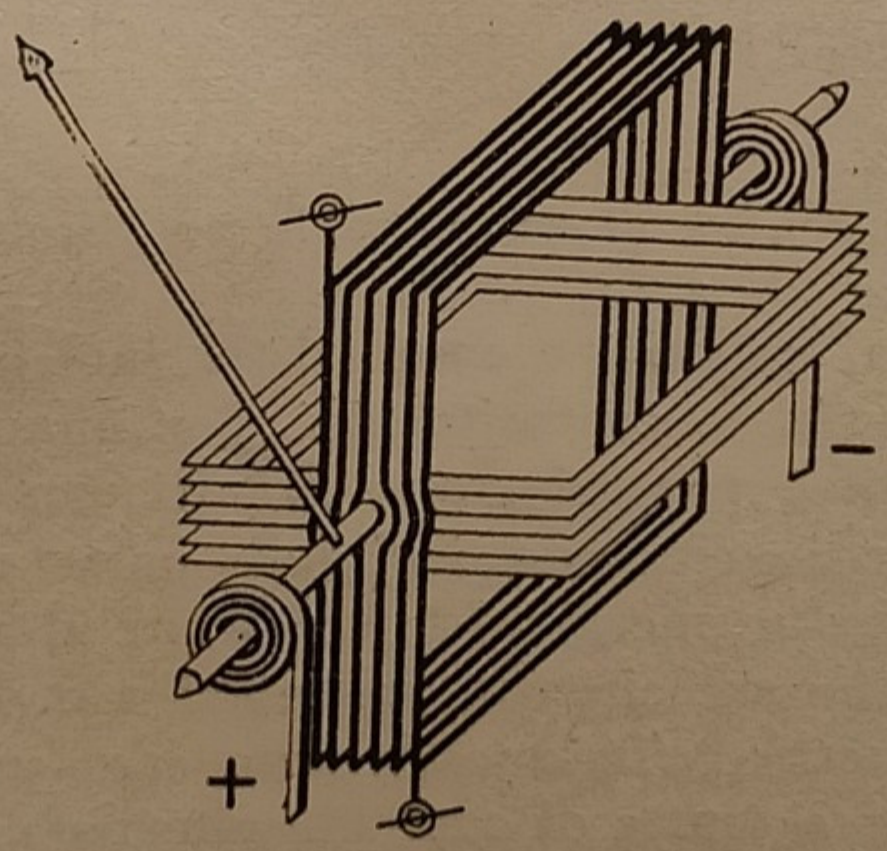


Fig. 187 - Schema di costruzione di wattmetro elettrodinamico.

Le due bobine fissa e mobile sono perpendicolari fra loro; passando corrente nelle due, la bobina mobile è sollecitata come fosse una calamita a ruotare per mettere il suo asse magnetico coincidente con quello della bobina fissa. La coppia

motrice è in ogni istante proporzionale alle correnti nei due circuiti cioè è proporzionale alla tensione e alla intensità e quindi ai watt.

Le due bobine si chiamano: *amperometrica* quella in serie sul circuito da misurare (fissa) e *voltometrica* quella in derivazione (mobile) perchè è percorsa da una corrente proporzionale ai volt. Un wattmetro così costruito serve tanto per c. c. che per c. a.

Un wattometro ha almeno 4 morsetti: due grossi per il circuito amperometrico e due piccoli per il voltometrico.

Per la misura della potenza di un circuito a due fili il wattmetro si dispone secondo uno dei due modi della figura 188. Se nel fare la lettura l'indice dell'istrumento va indietro, si scambiano gli attacchi al circuito voltmetrico od a quello amperometrico.

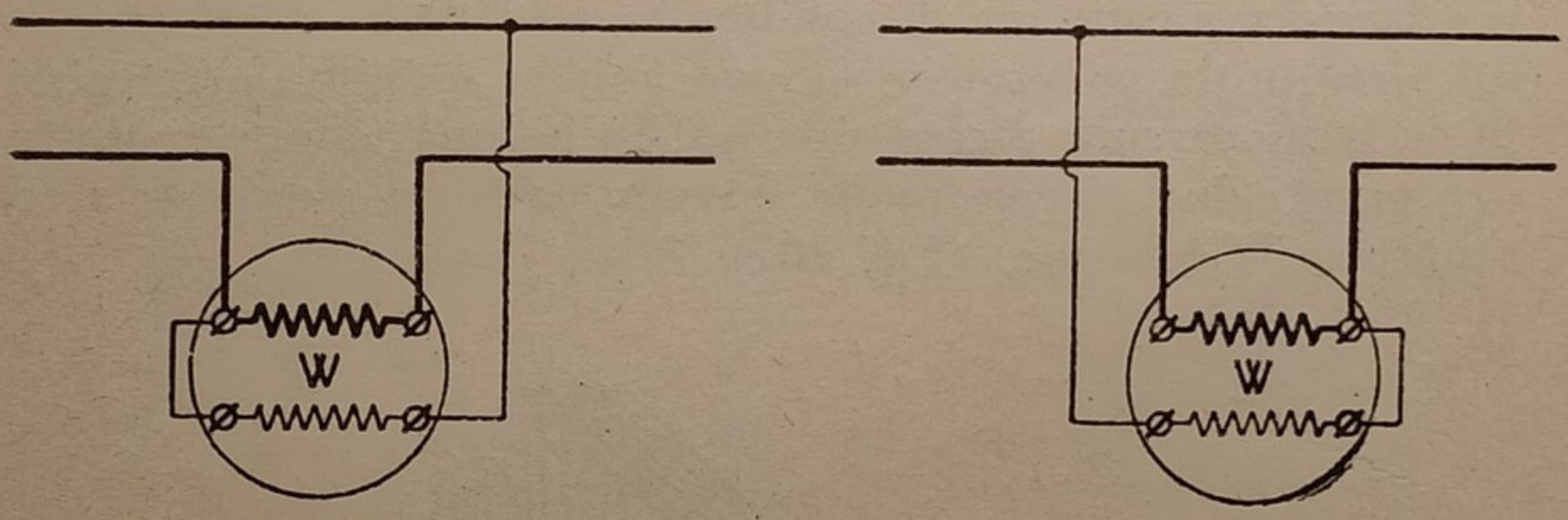


Fig. 188 . Inserzione di wattmetro in un circuito a due fili.

Quando nei collaudi e controlli si vuol applicare un determinato wattmetro, costruito cioè per una determinata intensità e tensione, per misurare circuiti con tensioni e intensità più grandi e cioè maggiori della portata dell'istrumento si adoperano i due mezzi: 1.° Applicare al wattmetro delle *resistenze esterne* sul circuito voltmetrico o dei *shunt* al *circuito amperometrico* (in quest'ultimo caso solo per corrente continua). 2.° Se si tratta di corrente alternata: ridurre la tensione troppo alta e la maggior intensità a quelle dell'istrumento mediante dei piccoli trasformatori riduttori di tensione e di intensità. Esaminiamo alcuni casi.

1.° Supponiamo di dover misurare col wattmetro da 200 volt un circuito a 500 V. Si inserisce allora in serie sul circuito voltometrico una resistenza addizionale di filo fino, per un

valore di ohm pari a tante volte la resistenza interna del circuito voltometrico quante volte 200 sta in 500 per esempio 3 volte. Se R è la resistenza ausiliaria e r la resistenza interna del circuito voltometrico, le letture del wattmetro (ossia la costante) devono essere moltiplicate per:

$$\frac{R + r}{r}$$

Le resistenze addizionali devono essere non induttive; esse vengono fornite dai costruttori insieme ai wattmetri.

Le resistenze addizionali ai circuiti voltometrici dei wattmetri si devono inserire sul tratto di filo che congiunge un morsetto al polo opposto a quello su cui è inserita la fase od il filo amperometrico. (Fig. 189).

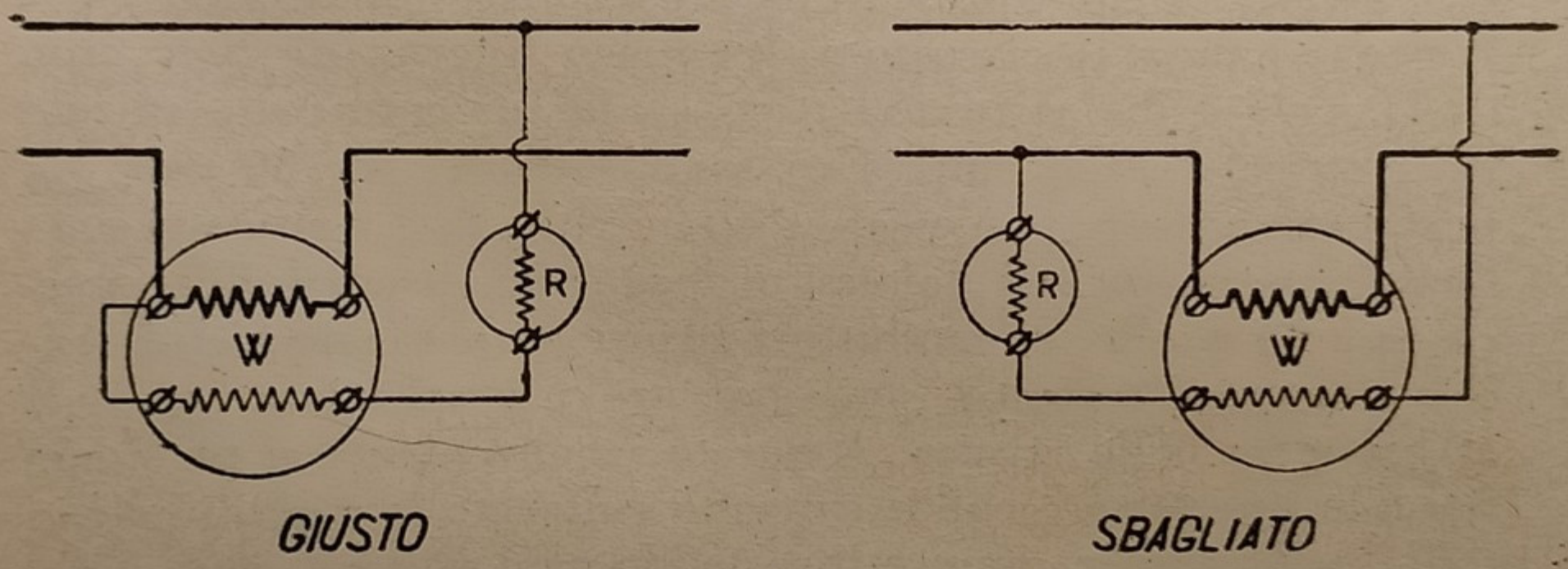


Fig. 189 - Inserzione di un wattmetro con resistenza addizionale sul circuito voltmetrico.

Il motivo di ciò è che internamente all'apparecchio i due circuiti amperometrico e voltometrico sono molto vicini fra loro e perciò fra essi non vi deve essere una forte differenza di potenziale. Ora col sistema della prima figura la condizione di cui sopra è soddisfatta; col sistema della seconda figura tra la spirale voltometrica e la amperometrica verrebbe a formarsi quasi la stessa differenza di potenziale che vi è tra i due fili esterni.

2.° Non è altrettanto facile aumentare la portata amperometrica di un wattmetro, mettendo un shunt ai morsetti amperometrici come si può fare per gli amperometri. L'applicazione dei shunt è possibile per misure di circuiti a cor-

rente continua ed usando speciali precauzioni; ma colla corrente alternata si avrebbero errori intollerabili perchè lo shunt è pressochè non induttivo mentre la spirale amperometrica è sensibilmente induttiva. Quindi la corrente nella spirale e nel shunt non si divide in ragione inversa delle resistenze ohmiche, ma in rapporto inverso delle reattanze.

Ad ovviare l'inconveniente si usa di costruire i wattmetri, specialmente quelli per laboratorio e portatili, suddividendo la bobina fissa amperometrica in due parti facenti capo a quattro morsetti. Per le portate più piccole si mettono le due bobine in serie; per le portate doppie si mettono le due bobine in parallelo. La portata quindi può essere come 1 : 2. I wattmetri portano gli schemi grafici che indicano come si devono attaccare i fili nei diversi casi.

I wattmetri più pregiati da laboratorio (Siemens, C. G. S. Weston) hanno il circuito voltmetrico interno di 1000 ohm — la scala è divisa in 150 parti — la corrente nella spirale voltmetrica di 0,03 amp. Essi sono costruiti per 30 volt. La portata in ampère può essere scelta a volontà. I wattmetri sono facilmente perturbati dai campi magnetici dispersi delle macchine o da quelli dei conduttori a forte amperaggio vicini. Anche il campo terrestre può arrecare perturbazioni sensibili all'esattezza delle misure. A questo inconveniente si provvede facendo due letture coll'istrumento collocato in una direzione e poi nell'opposta, oppure invertendo ogni volta il senso delle correnti nelle due spirali.

Oltre ai wattmetri elettrodinamici si costruiscono per quadri dei *wattmetri ad induzione* formati da un disco montato su un asse e portante l'indice. Affacciato al disco vi sono due elettromagneti coi nuclei di ferro lamellari ed avvolti uno (amperometrico) per la corrente del circuito da misurare e l'altro (voltmetrico) col filo fino per la tensione come negli altri strumenti. Il disco è sollecitato a girare ove non fosse trattenuto da una molla a spirale. L'indice segna su un quadrante i watt. Come strumenti portatili di precisione questi wattmetri non possono essere adoperati per gli errori sensibili cui danno luogo se si cambia la frequenza.

113. Misura della potenza dei circuiti trifasi. — La inserzione dei wattmetri può essere diversa a seconda che si tratta di circuiti equilibrati o squilibrati.

1.° *Circuiti equilibrati.* Se il circuito trifase a misurare è equilibrato cioè la tensione è uguale fra le tre fasi, ed uguale l'intensità nelle medesime, si può fare la misura della potenza inserendo un sol wattmetro monofase, mettendo il circuito amperometrico sopra una fase ed il voltometrico fra questa fase ed il centro neutro di un motore o trasformatore.

I watt effettivi si ottengono moltiplicando per 3 le letture del wattmetro. (Figura 190).

Se non vi è centro neutro accessibile a cui si possa attaccare il circuito voltometrico lo si crea artificialmente. Perciò si forma una stella di tre resistenze di cui una è data dal circuito voltometrico (eventualmente colla sua resistenza ausiliaria); le altre due da due resistenze uguali alla prima. (Fig. 191). Si può fare una stella di tre resistenze uguali ma molto più piccole di quella del voltometro (3 grosse lampade perfettamente uguali) in modo da consumare un paio di ampères.

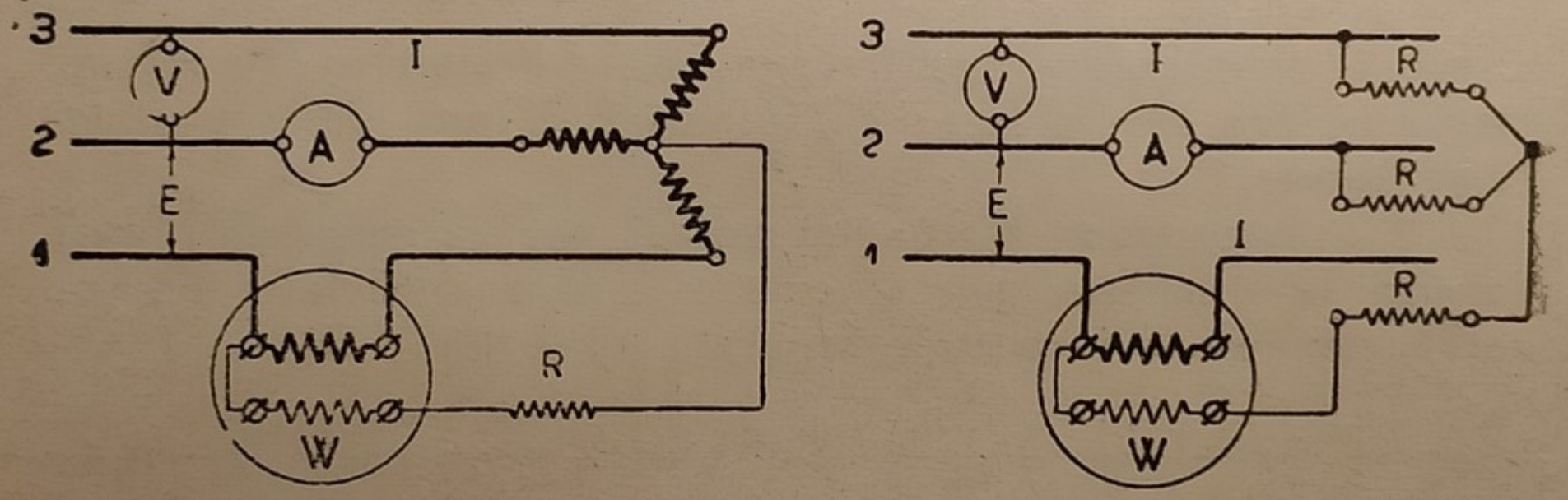


Fig. 190 - 191 - Inserzione di un sol wattmetro per la misura dei circuiti trifasi equilibrati.

Quando si è sicuri che oltre all'uguaglianza di intensità nelle fasi (fasi equilibrate), sono anche uguali le tensioni si può rilevare il consumo di energia con un wattmetro solo portabile anche se il circuito è induttivo (caso dei motori trifasi). Perciò si inserisce la spirale amperometrica sopra la fase 2 e la voltometrica successivamente fra la fase 2 e le fasi 1 e 3. Se le due letture sono positive il consumo è dato dalla somma; ma se una lettura è positiva e l'altra negativa (di modo che si è obbligati per questa a invertire gli attacchi amperometrici) il consumo è dato dalla differenza delle due letture. (Fig. 192).

Quando si vuol rilevare il fattore di potenza (cos φ) in

un circuito equilibrato oltre al wattmetro bisogna inserire un amperometro sopra una fase e un voltmetro nei modi indicati dalle figure precedenti. Il valore di detto fattore è dato:

$$\cos \varphi = \frac{W}{E\ I\ \sqrt{3}}$$

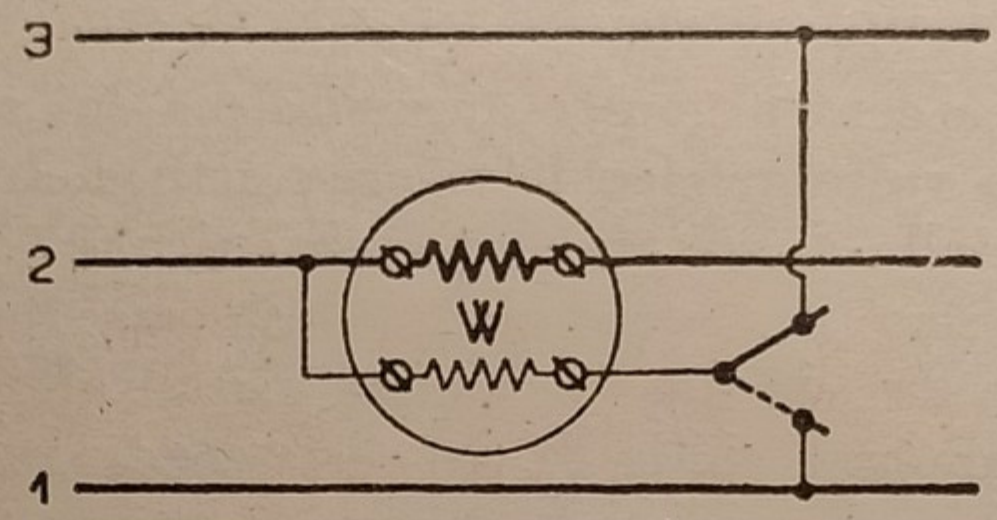
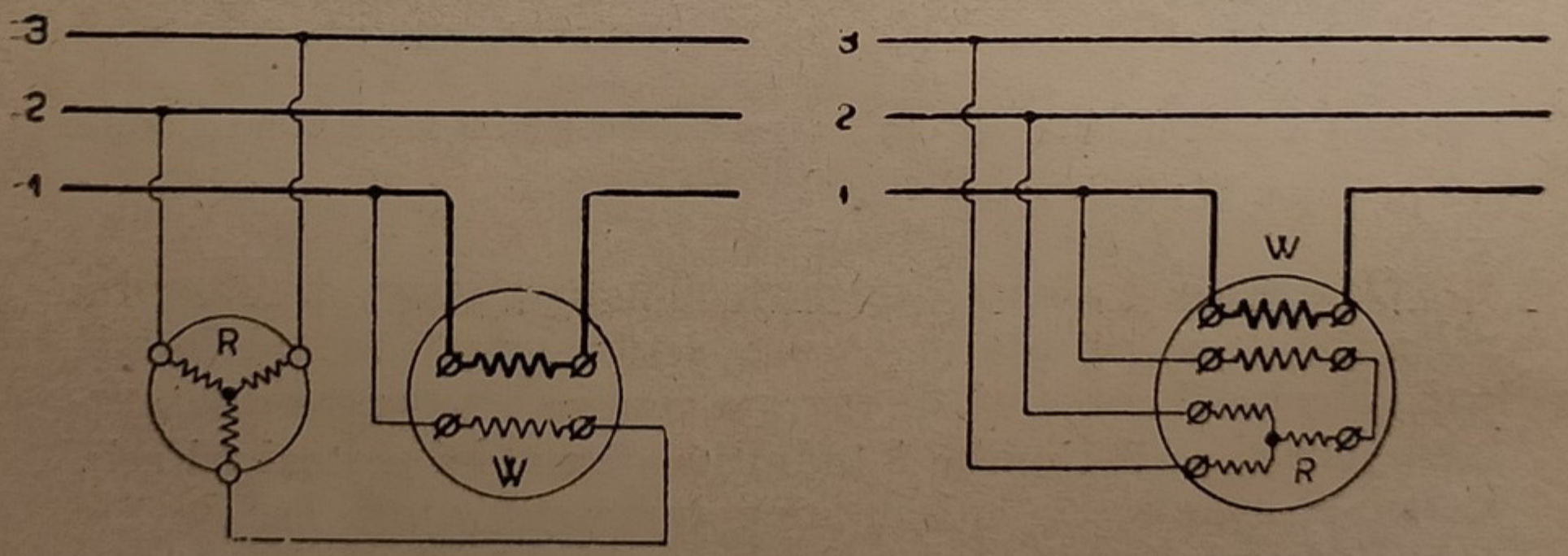


Fig. 192 - Altro sistema di inserzione di wattmetro semplice per misura di circuiti trifasi equilibrati.

dove W rappresenta i watt segnati dal wattmetro; E i volt di tensione fra fase e fase; I l'intensità di una delle tre fasi equilibrate.

Si costruiscono wattmetri trifasi per carichi equilibrati aventi le resistenze per il centro neutro artificiale interne all'istrumento o in scatola separata. (Fig. 193-194).



Figg. 193 - 194. - Wattmetri muniti di resistenza a stella esterna od interna.

Il sistema di creare un centro neutro artificiale non è adattabile ai wattmetri ad induzione poichè anche facendo le tre resistenze a stella uguali si ha sempre una differenza

nell'intensità delle medesime essendo la resistenza del circuito voltometrico induttiva.

Il sistema di rilievo della potenza con un sol wattmetro per circuiti equilibrati non dà sempre sufficienti garanzie di sicurezza. Perciò ove appena lo si possa conviene adoperare il sistema dei due wattmetri che segue.

2.° *Circuiti squilibrati. - Metodo dei due wattmetri.* Il sistema più rigoroso per la misura dei circuiti trifasi consiste nell'impiego di due wattmetri monofasi W_1 e W_2 ed inserendo le spirali amperometriche per esempio nei fili 1 e 3 di fase e le voltometriche rispettivamente fra le fasi 1-2 e 3-2. (Fig. 195). La potenza consumata è data dalla somma algebrica delle letture dei due wattmetri.

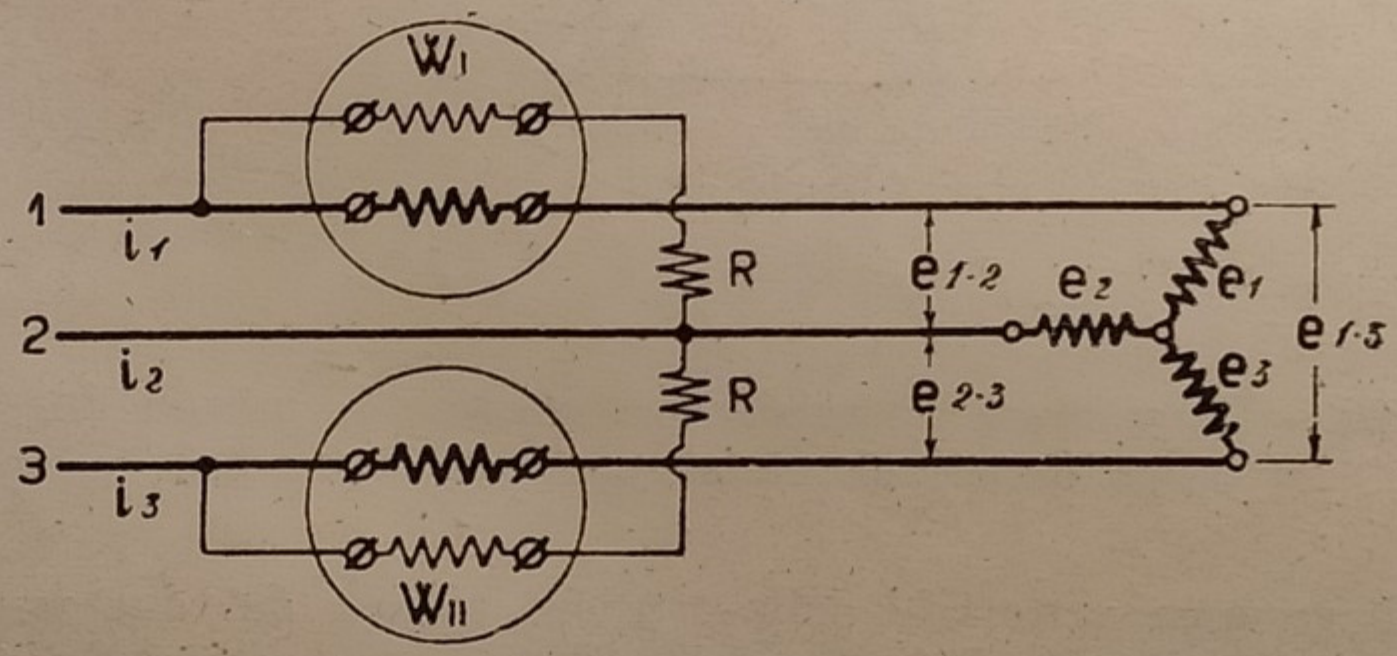


Fig. 195. - Inserzione di 2 wattmetri monofasi per misura di circuiti trifasi squilibrati.

Per sicurezza dopo una serie di misure si possono scambiare i due wattmetri e ripetere le letture.

Con questo sistema la potenza istantanea effettivamente misurata dai wattmetri secondo la figura 195 sarebbe:

$$w = i_1 \, e_{1\text{-}2} + i_3 \, e_{2\text{-}3}$$

ma la potenza del sistema in ogni istante è data evidentemente da:

$$w = e_1 \, i_1 + e_2 \, i_2 + e_3 \, i_3$$

Siccome in un sistema trifase in ogni istante $i_2 = -(i_1 + i_3)$ sostituendo si ha:

$$w = i_1 \, (e_1 - e_2) + i_3 \, (e_3 - e_2)$$

ma $e_1 - e_2 = e_{1\text{-}2}$ e $e_3 - e_2 = e_{2\text{-}3}$ perciò:

$$w = i_1\, e_{1\text{-}2} + i_3\, e_{2\text{-}3}$$

Cioè i due wattmetri segnano sempre in ogni istante la potenza del circuito. Analoga dimostrazione si può fare ammettendo il circuito utilizzatore a triangolo. La dimostrazione vale comunque le tre intensità siano squilibrate fra loro e sfasate rispetto alle f. e. m.; vale infine anche per i valori efficaci delle intensità e f. e. m.

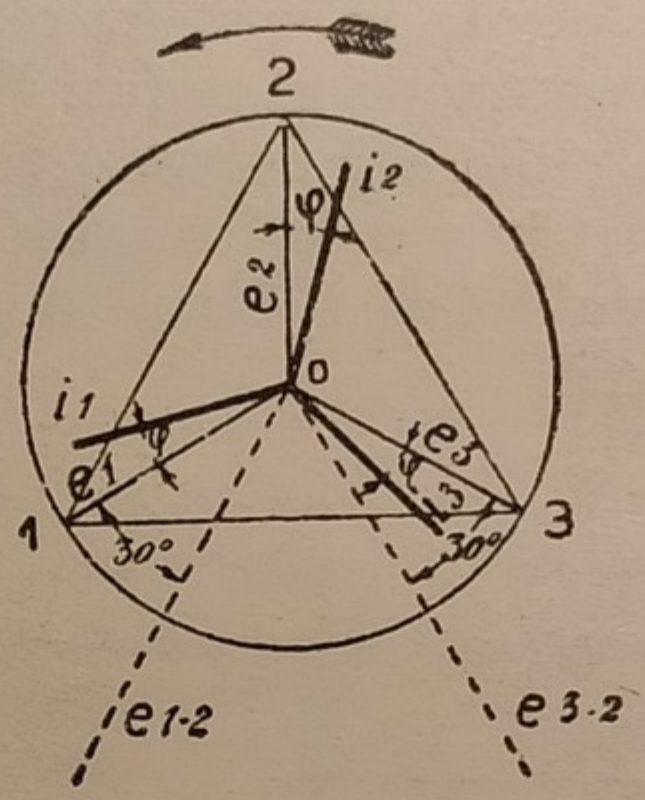


Fig. 196. - Diagramma vettoriale per spiegare la misura dei circuiti squilibrati col metodo dei due wattmetri.

Il diagramma vettoriale delle tensioni efficaci dei due wattmetri è rappresentato dalla fig. 196. Siano 01, 02, 03, i tre vettori delle tensioni rispetto al centro neutro e per semplicità supponiamo che siano uguali. Se non vi fosse sfasamento fra intensità e f. e. m., i vettori 0-1, 0-2, 0-3 potrebbero rappresentare anche le rispettive intensità nei fili 1—2—3. Ma essendo generalmente sfasate esse assumeranno le posizioni Oi_1, Oi_2, Oi_3, spostate dell'angolo φ rispetto ai tre vettori delle tensioni 01-02-03. Supponiamo che lo sfasamento φ sia uguale per tutte e tre le fasi. Ora siccome il circuito voltometrico del wattmetro W1 è inserito fra le fasi 1 e 2 il vettore relativo sarà Oel-2 parallelo a 1-2; esso forma col vettore della intensità nel circuito amperometrico l'angolo $30° + \varphi$.

Similmente il circuito voltometrico del wattmetro W2 è percorso da una corrente in fase con 2-3 ed è rappresentata dal vettore Oe3-2. Questo vettore forma colla intensità I_3 un angolo $30 - \varphi$. Per cui le potenze medie segnate dai due wattmetri considerati come separati e applicati a due circuiti monofasi qualsiasi saranno rappresentate:

$$W_1 = e_{1\text{-}2}\, i_1 \cos (30 + \varphi) \qquad W_2 = e_{3\text{-}2}\, i_3 \cos (30 - \varphi)$$

Se le f. e. m. e le intensità sono uguali avremo:

$$W_1 = e\, i \cos (30 + \varphi) \qquad W_2 = e\, i \cos (30 - \varphi)$$

Sommando le due equazioni si ha:

$$W_1 + W_2 = e\,i\,[\cos(30 + \varphi) + \cos(30 - \varphi)]$$
$$= e\,i\,(\cos 30 \cos \varphi - \text{sen } 30 \text{ sen } \varphi + \cos 30 \cos \varphi + \text{sen } \varphi \text{ sen } 30)$$
$$= e\,2\,i \cos 30 \cos \varphi = e\,i\sqrt{3} \cos \varphi$$

che rappresenta appunto la potenza dei circuiti trifasi a carico equilibrato.

Con analoga dimostrazione si può dimostrare che $W_1 + W_2$, rappresenta l'energia totale del circuito trifase anche se il carico non è equilibrato.

Dal diagramma della fig. 196 si deduce che nel wattmetro W, se $\varphi = 60^0$ allora $30 + \varphi = 90$ quindi $\cos \varphi = 0$ cioè il wattmetro segna zero. Ora è noto che $\cos 60^0 = 0{,}5$ quindi tutte le volte che il fattore di potenza è uguale a 0,5 uno dei wattmetri segna zero; se cos φ è maggiore di 0,5 le letture dei wattmetri vanno sommate aritmeticamente; se cos φ è minore di 0,5 allora le letture dei wattmetri W_1 devono andar sottratte da W_2.

Capita talvolta nella pratica nel fare le misure di potenza di motori, trasformatori, quando funzionano a vuoto o con piccolo carico, che applicati i due wattmetri non si possa sapere se le rispettive letture vanno sommate o sottratte. Basta perciò fare questa esperienza. Si allacino fra di loro le due spirali voltometriche escludendo gli attacchi alla fase 2 (Fig. 197). Se i due wattmetri danno indicazioni negative le letture si devono sottrarre.

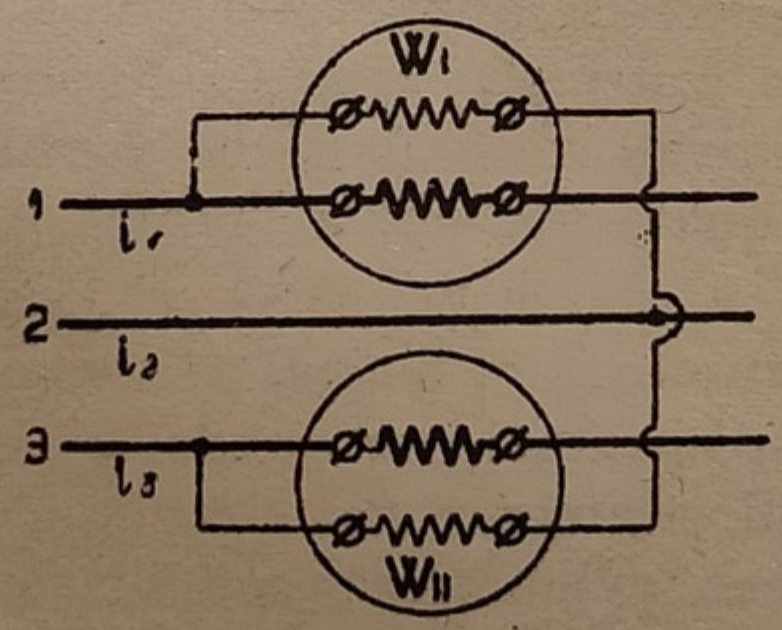


Fig. 197. - Metodo per verificare se le letture dei due wattmetri vanno sommate o sottratte.

Dalle letture dei due wattmetri W_1 e W_2 si può desumere il fattore di potenza cos φ in questo modo: si faccia il rapporto fra la lettura più piccola e la più grande ossia $\frac{W_1}{W_2} = K$. Dalla tabella che segue si cava il valore corrispondente di cos φ e dell'angolo φ.

φ gradi	cos φ	K	φ gradi	cos φ	K
0	1.000	1.000	38	0.788	0.378
4	0.997	0.923	40	0.866	0.348
6	0.994	0.886	42	0.743	0.316
8	0.990	0.894	44	0.719	0.283
10	0.984	0.815	46	0.695	0.251
12	0.978	0.781	48	0.669	0.218
14	0.970	0.747	50	0.643	0.184
16	0.961	0.715	52	0.615	0.150
18	0.951	0.683	54	0.588	0.114
20	0.939	0.653	56	0.559	0.077
22	0.927	0.621	58	0.530	0.038
24	0.913	0.591	60	0.500	0.000
26	0.899	0.560	62	0.469	—0.050
28	0.883	0.530	64	0.438	—0.100
30	0 886	0.500	66	0.407	—0.150
32	0.848	0.478	70	0.342	—0.250
34	0.829	0.439	72	0.309	—0.300
36	0.809	0.411	75	0.258	—0.400

Questa tabella è applicabile soltanto quando il carico è equilibrato.

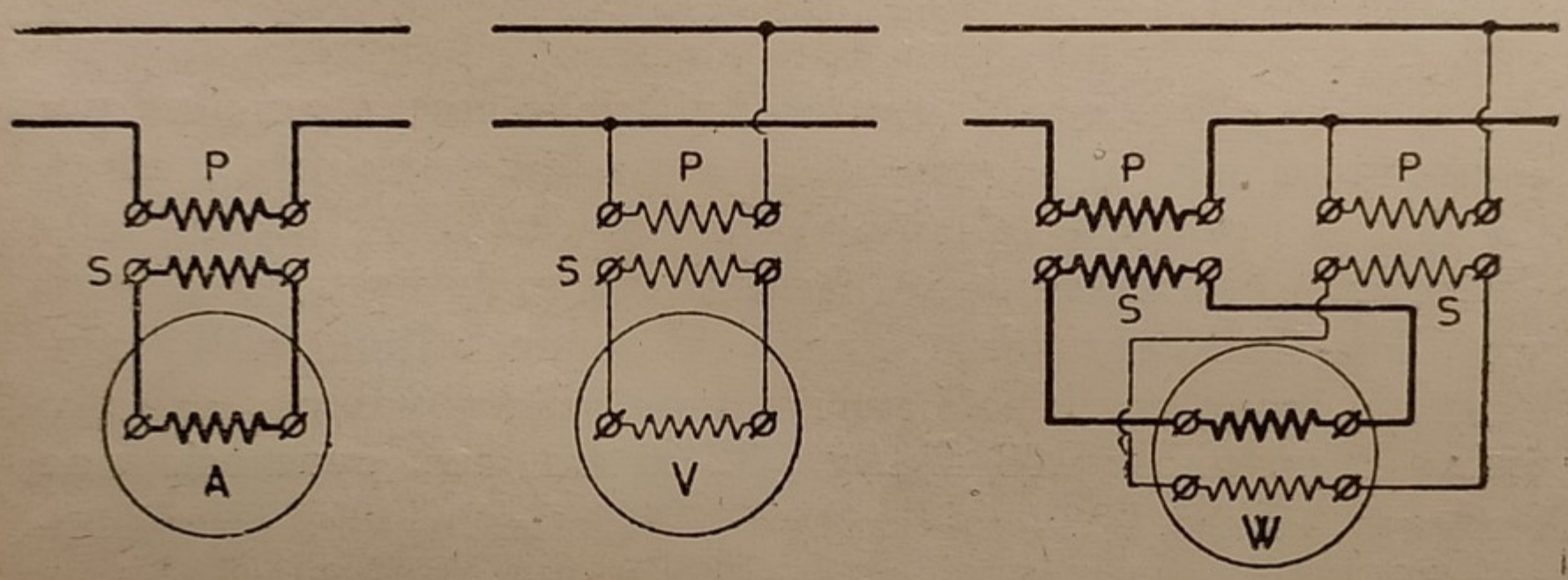
Quando si tratta di *wattmetri da quadro per circuiti non equilibrati*, allora non si adoperano due wattmetri monofasi ma si costruiscono wattmetri aventi due spirali amperometriche fisse e due spirali voltometriche mobili calettate sopra un unico asse, il quale poi porta l'indice.

114. Trasformatori riduttori di corrente e di tensione. — Gli strumenti misuratori per quadri o per verifiche non si possono inserire direttamente nei circuiti a corrente alternata ad alta tensione per evidenti ragioni di sicurezza personale; gli strumenti non potrebbero essere toccati senza il pericolo di scosse e fulminazioni.

Perciò è necessario intromettere fra i circuiti ad alta tensione e gli apparecchi di misura, dei piccoli trasformatori aventi il primario allacciato col circuito da misurare ed il secondario all'apparecchio e tenendo i due avvolgimenti completamente separati e fortemente isolati l'uno dall'altro. I trasformatori riduttori possono essere di *tensione* e di *intensità* o di *corrente*. I primi servono per attacco di voltmetri e bobine

voltometriche di wattmetri e di contatori i secondi servono per gli amperometri e per le bobine amperometriche di wattmetri e di contatori. I primi hanno un rapporto costante fra tensione primaria e secondaria; i secondi hanno invece un rapporto costante fra l'intensità primaria e la secondaria. I riduttori di corrente sono trasformatori ordinari ma col secondario in corto circuito a mezzo delle bobine amperometriche degli strumenti inseriti. Anzi quando si devono fare misure di controllo con questi riduttori bisogna avere la precauzione di non tenere aperto il secondario perchè potrebbero dare scosse moleste o creare sovratensioni pericolose per gli strumenti di controllo innestati.

Nelle fig. 198, 199, 200 sono rappresentati un amperometro, un voltometro, un wattmetro munito di riduttori.



Figg. 198 - 199 - 200 . Inserzione di amperometro voltmetro e wattmetro con trasformatori riduttori.

La tensione secondaria dei trasformatori riduttori di tensione si tiene quasi sempre di 100 o 110 volt; l'intensità della corrente secondaria dei riduttori d'intensità si fa fra 1 e 5 Ampère. Normalmente si adoperano 5 amp.

Gli strumenti forniti insieme ai rispettivi riduttori vengono dai fabbricanti tarati insieme; gli strumenti naturalmente hanno una scala fittizia corrispondente alla massima tensione primaria del riduttore di tensione o alla massima intensità primaria del riduttore di intensità.

Se si dovesse accoppiare ad un amperometro o ad un voltmetro a scala naturale dei riduttori, le letture degli strumenti devono essere moltiplicate per il rapporto di trasfor-

mazione dei riduttori. Se con un wattmetro o con un contatore, costruiti come di solito per 5 amp. e 100 volt, si volesse misurare la potenza o lavoro di circuiti di molto maggior intensità e tensione, mediante inserzione di trasformatori riduttori, per avere l'esatto valore della potenza o lavoro bisogna moltiplicare le letture per il prodotto dei rapporti di trasformazione dei riduttori. Così se il riduttore di intensità ha il rapporto 200 Amp. a 5 amp. (R' = 40) quello di tensione di 2000 V. a 100 V. (R" = 20) le letture del wattmetro o del contatore si moltiplicheranno per 40 × 20 ossia per 800.

115. Misura della quantità di corrente (amperorametri o coulombometri). — Il misuratore più preciso dei coulomb per corrente continua sarebbe il voltametro a sale di rame o d'argento di cui abbiamo già parlato al parag. 107. Esso però non si può impiegare che per piccole intensità di qualche ampère o frazione di ampère; richiede cure minuziose per la preparazione ed è quindi uno strumento limitato a ricerche di laboratorio. I voltametri sono basati sul principio della elettrolisi e precisamente sul fatto che facendo passare una corrente continua attraverso a una soluzione salina, 96540 coulomb separano un peso in gr. uguale all'equivalente chimico ossia: 1 gr. di H; 108 di Ag.; 32 di Cu, ecc. ovverosia una coulomb separa 1,118 mmg. Ag o 0,328 di Cu, ecc. (Vedi parag. 107).

Ma il misuratore pratico ed industriale dei coulomb o meglio degli ampère-ora per corrente continua è il tipo *a motore*. I contatori amperorametrici a motore sono piccoli motori magneto - elettrici fondati cioè sull'azione di un magnete permanente sopra un avvolgimento percorso dalla intensità di corrente da misurare.

Constano di un magnete d'acciaio ad U munito di espansioni polari. (Fig. 201). Nel campo magnetico compreso fra le branche delle espansioni polari vi è una campana od un disco girevole di alluminio sul quale sono applicate diverse spirali o bobine piatte di filo sottile che fanno capo ad un collettore munito di spazzole. Si ha quindi un piccolo motore con campo magnetico costante il cui numero di giri è proporzionale agli ampères passanti ed al tempo.

La coppia antagonista è data dalle correnti di Foucault

che si sviluppano nella campana o nel disco che fanno da freno. Generalmente le spirali, o bobine di filo che costituiscono l'indotto, sono in derivazione sopra uno shunt R fisso nel contatore. Fermo il principio di costruzione, questi contatori sono oggetto naturalmente dai fabbricanti di molte modificazioni di dettaglio.

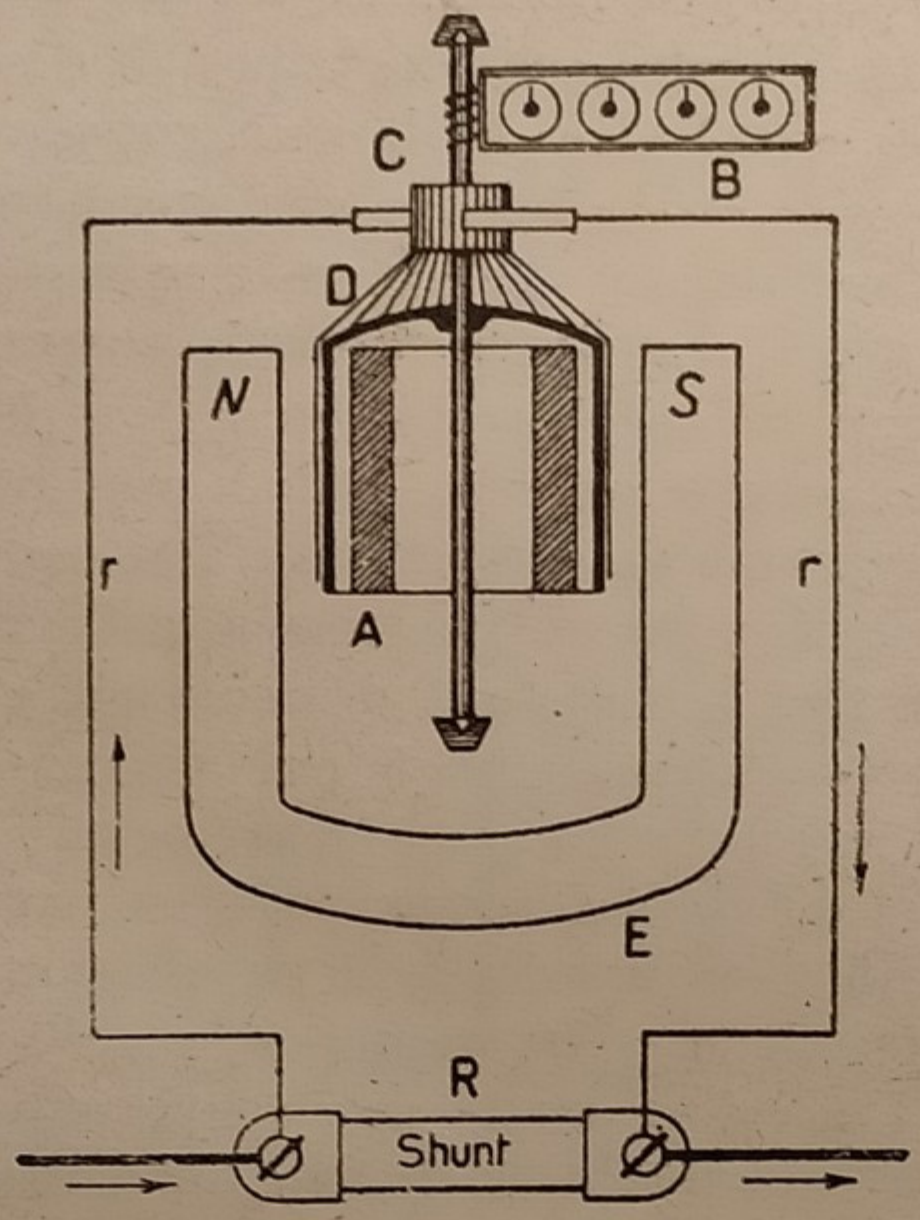


Fig. 201 - Contatore a motore amperometrico.

Nelle reti a tensione costante questi contatori possono servire anche come *wattorametri*, moltiplicando gli ampère-ora per la tensione di regime della rete. Servono unicamente per circuiti a corrente continua.

116. Misura della quantità di energia (wattorametri o joulmetri). — Appartengono a questa categoria gli ordinari *contatori* applicati per misurare l'energia consumata dagli utenti di luce elettrica e di forza motrice.

I contatori sono dei wattmetri in cui all'equipaggio mobile è sostituito un equipaggio ruotante e alla scala un contagiri. Alla forza antagonista viene sostituito una coppia frenante tale da essere proporzionale alla velocità di rotazio-

ne; perciò la coppia attiva proporzionale ai watt, trova per ogni velocità un equilibrio nella forza frenante. Ne risulta che il numero dei giri dei contatori è proporzionale ai watt. *Ogni giro dell'equipaggio mobile rappresenta un determinato numero di joule o watt-ore.*

I contatori d'energia, si compongono delle seguenti parti che formano l'*equipaggiamento*: 1.° di un circuito ampèrometrico; 2. di un circuito voltometrico; 3. di un equipaggio o albero girevole verticale; 4. di una coppia frenante data da un disco montato sull'albero e che gira fra le branche di una calamita d'acciaio; 5. di un meccanismo contagiri dell'alberello. Nel disco si sviluppano delle correnti di Foucault le quali reagiscono col loro campo magnetico indotto in modo da impedire una accelerazione, e da mantenere la velocità esattamente proporzionale alla coppia attiva data dall'azione concomitante del circuito voltmetrico e ampèrometrico.

Vi sono due tipi ben distinti di contatori e precisamente:

1.° *Contatori elettrodinamici* per corrente continua ed alternata — ma specialmente impiegati per la continua.

2.° *Contatori ad induzione* per sola corrente alternata.

I contatori elettrodinamici sono rappresentati schematicamente dalla fig. 202. Si compongono di un alberello verticale trá due perni; l'inferiore porta una pietra d'agata durissima. L'alberello porta un rotolo A di filo finissimo avvolto come quello di un indotto di dinamo e munito di un collettore C con poche lamelle. Questo avvolgimento costituisce il circuito voltmetrico. Il circuito ampèrometrico è formato da due bobine di filo grosso B inserite in serie sopra uno dei conduttori del circuito da misurare; le bobine comprendono fra loro l'indotto girevole. Il circuito voltometrico (in derivazione sul circuito da misurare) contiene una resistenza G variabile a volontà ed una bobina di filo L interna ad una delle bobine amperometriche B. Lo alberello porta anche un disco d'alluminio il quale può girare fra le branche di un magnete d'acciaio; nonchè una vite senza fine che muove il rotismo di un contagiri D. Sul collettore C si appoggiano due esili spazzoline metalliche. Il rotolo A girevole non ha nessun nucleo di ferro e così le bobine B.

Il funzionamento del contatore è il seguente: il rotolo di filo forma l'*indotto* girevole di un piccolo motore il cui campo

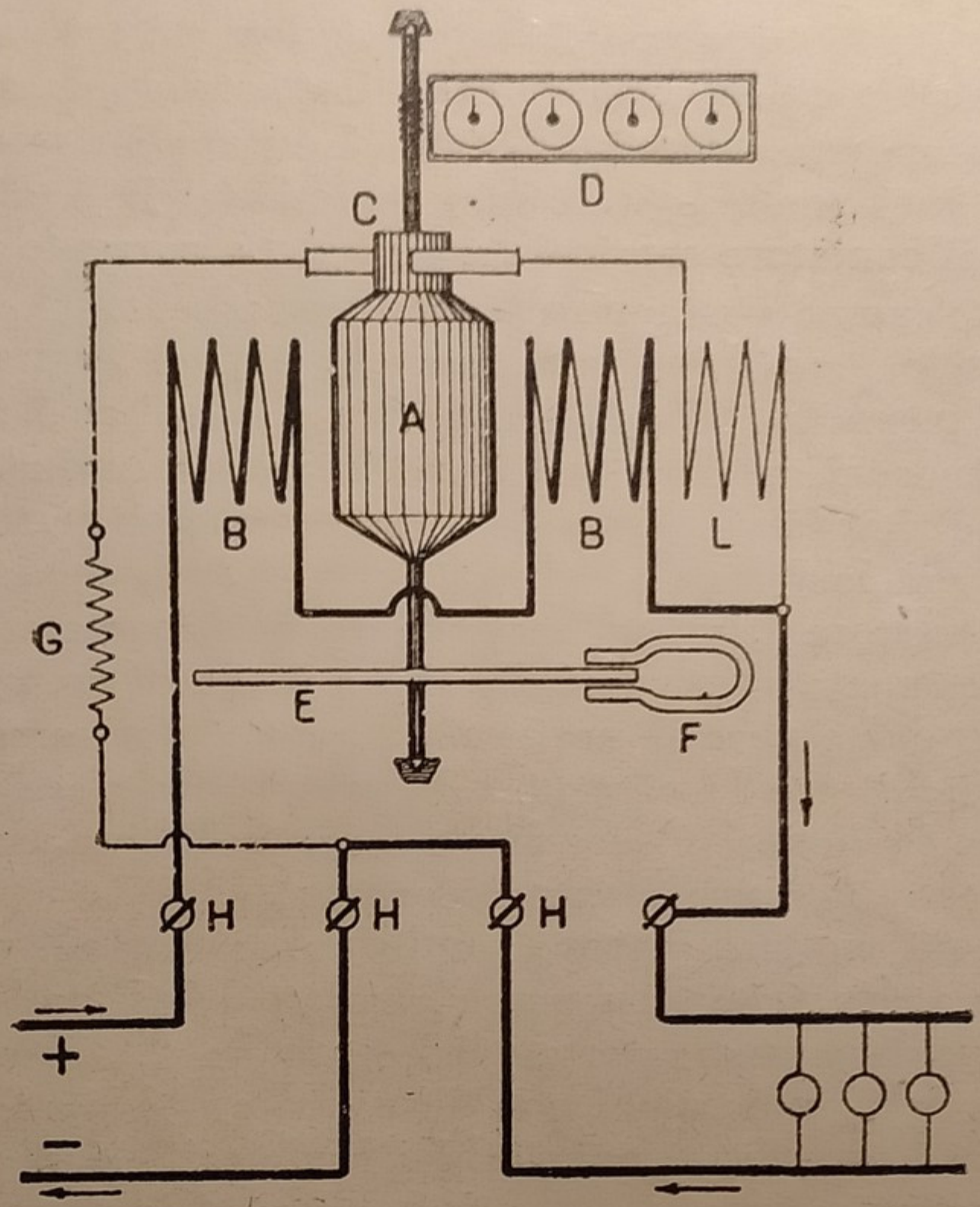


Fig. 202 - Schema di un contatore di watt-ore per corrente continua.

magnetico *induttore* è dato dalle bobine amperometriche B. La coppia attiva di rotazione è proporzionale alla corrente nell'indotto e cioè alla tensione (poichè il circuito voltmetrico è in derivazione) e al campo magnetico delle bobine fisse e cioè alla intensità della corrente nel circuito; la coppia attiva è quindi proporzionale ai watt. Se non vi fosse il disco frenante l'albero assumerebbe una velocità accelerata; invece siccome la coppia antagonista è esattamente proporzionale alla velocità, così l'alberello coll'indotto ed il disco assumeranno una velocità di equilibrio proporzionale alla coppia attiva cioè ai watt. Ma se la velocità è proporzionale ai watt ciò significa che ad ogni giro corrisponde un determinato numero di watt-ora e quindi contando i giri si contano effettivamente i watt-ora.

A vincere gli attriti dei perni e delle spazzoline sul collettore serve la bobina di filo L in serie coll'indotto; questa

bobina detta *aiuta-campo* o di *compensazione* crea un debole campo magnetico che agendo sull'indotto tende da solo a farlo girare, ma senza riuscire di fatto. Così appena una minima corrente passa nelle spirali amperometriche B, l'equilibrio è rotto ed il contatore comincia a girare. La corrente nella bobina aiuta-campo si regola colla resistenza G.

Quando il contatore non avesse a segnare esattamente si sposta il magnete F che agisce da freno sul disco E; spostandolo in fuori si aumenta la coppia frenante e quindi la velocità viene ritardata; spostandolo in dentro cioè verso l'albero si accelererà la velocità.

Il contatore descritto serve tanto per corrente continua che per corrente alternata nello stesso modo di un wattmetro. Ordinariamente però il suo uso è limitato alla corrente continua, perchè per la corrente alternata si adopera un altro tipo di costruzione più semplice e senza collettore, organo delicato e che esige una manutenzione.

I buoni contatori devono soddisfare ai seguenti requisiti: 1.° Devono cominciare a segnare correnti deboli dall'1 al 2 % della corrente massima portata dal contatore. 2.° L'errore nella esattezza delle indicazioni non deve essere maggiore del 4 %. Il consumo proprio di energia dei contatori è di 1 a 3 watt circa a pieno carico; la corrente nel circuito voltometrico di 15 a 27 millampère.

2.° *Contatori ad induzione.* Al paragrafo 96 abbiamo dimostrato che quando due campi magnetici alternativi sono spostati di fase e sono inclinati l'uno rispetto all'altro, essi danno luogo ad un campo ruotante. Ora aggiungiamo che se due campi magnetici alternativi sono spostati di fase e accostati l'uno all'altro essi danno luogo ad un campo magnetico risultante di carattere traslativo invece che rotativo.

In tutti i contatori moderni a corrente alternata monofase si ha un alberello verticale girevole portante un disco di alluminio sul quale agiscono un campo amperometrico ed uno voltometrico. Il primo è dato da un elettromagnete a nucleo lamellare avvolto con poche spirali di filo grosso che si dispongono *in serie* sul circuito da misurare; il secondo da un altro elettromagnete di sottil filo con un grandissimo numero di spire e che si mette in derivazione sullo stesso circuito (figura 203).

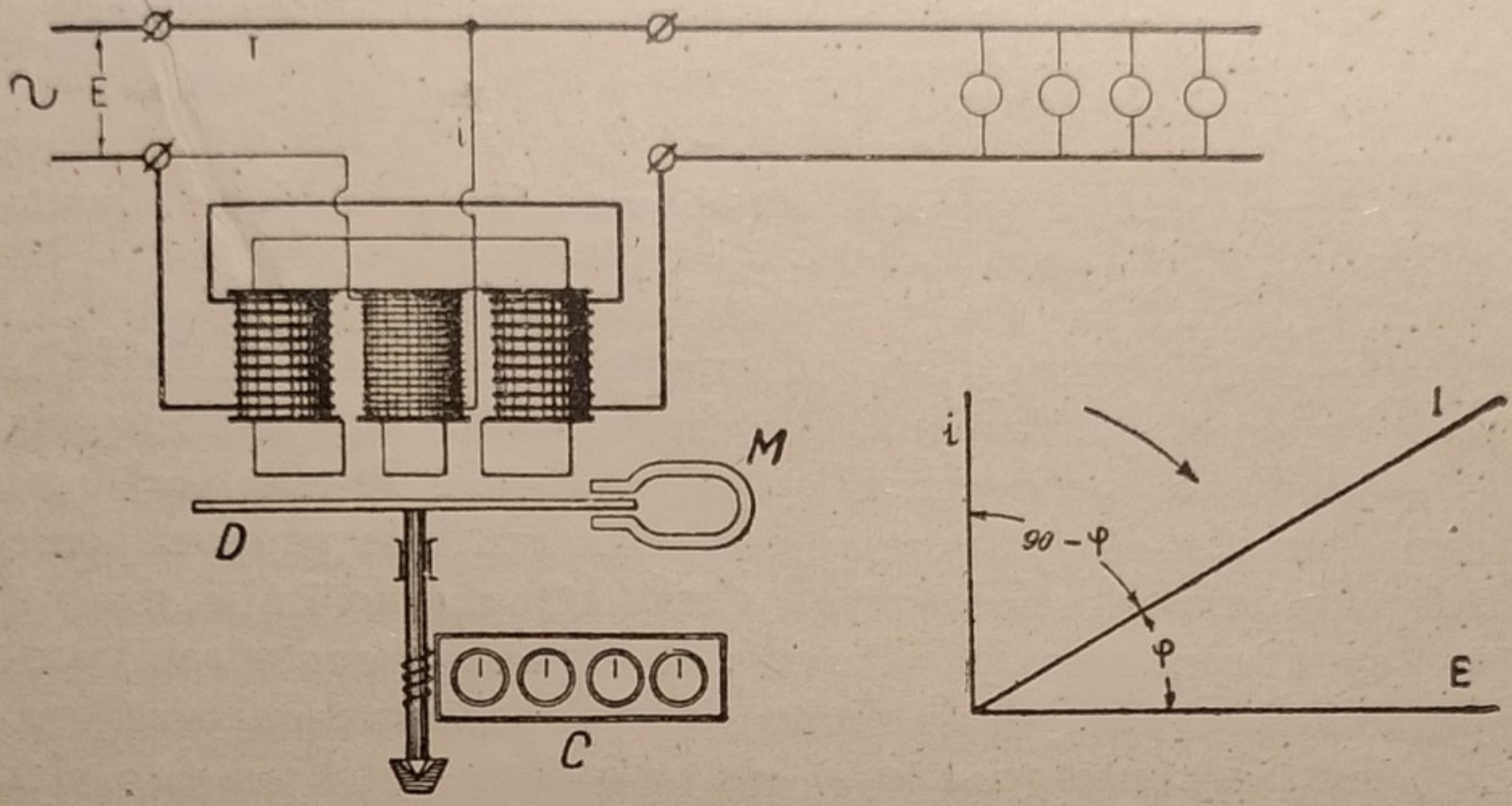


Fig. 203 . Schema di contatore di watt-ore per corrente alternata e schema vettoriale.

La posizione relativa dei due elettromagneti è molto diversa da costruttore a costruttore. Così, come è disegnato nella figura, uno dei sistemi più diffusi consiste nell'affacciare al disco un elettromagnete a tre branche di cui le due esterne sono avvolte dal circuito amperometrico, quella di mezzo dal circuito voltometrico. Altri fabbricanti fanno il contrario; altri mettono un elettromagnete sopra e uno sotto al disco, ecc.

Qualunque sia il sistema adottato, nel circuito voltmetrico a molte spire si forma una piccola corrente *i* proporzionale alla f. e. m. E, ma spostata di fase di 90° rispetto ad E per la grande selfinduzione. Supposto che il carico del circuito da misurare sia induttivo, la corrente I sarà in ritardo di fase dell'angolo φ rispetto alla tensione E. I campi magnetici di *i* e di I danno luogo ad un campo magnetico risultante rotatorio o traslatorio che eccita nel disco delle correnti di Foucault. Per l'azione elettrodinamica fra il campo risultante e le correnti si svilupperà una coppia attiva che farà girare il disco. Nella fig. 203 è rappresentato il diagramma vettoriale delle correnti agenti sul disco: Oi vettore del campo voltometrico è spostato di 90° in ritardo rispetto al vettore della tensione OE. Il vettore OI del campo amperometrico forma un angolo φ di spostamento con OE ed un angolo $90° - \varphi$ con Oi.

La coppia attiva agente sul disco sarà proporzionale ad *i* (cioè ad E perchè la corrente *i* è derivata fra i due fili del circuito da misurare); sarà pure proporzionale ad I; ma siccome i campi Oi e OI sono inclinati di $90 - \varphi$ la coppia suddetta potrà essere rappresentata da:

$$C = K\ I\ E\ \text{sen}\ (90° - \varphi)$$

dove K è un coefficiente fisso. Ma siccome sen $(90^0 - \varphi)$ è uguale a cos φ la coppia attiva diventa:

$$C = K\ I\ E \cos \varphi$$

cioè ad una quantità proporzionale ai watt. Questo risultato è esatto solo quando E ed *i* siano esattamente in quadratura.

La coppia antagonista o frenante del contatore è data dal solito magnete permanente che agisce sul disco; questa coppia è esattamente proporzionale alla velocità. Perciò per ogni càrico in watt si avrà una velocità di equilibrio proporzionale alla coppia attiva cioè ai watt stessi. Integrando i giri, con un contagiri applicato all'alberello, il numero segnato sarà proporzionale ai watt ed al tempo cioè proporzionale ai watt-ora.

Tutti i contatori a c. a. portano come quelli a c. c. dei dispositivi per correggere l'*esattezza* delle indicazioni, la *sensibilità* per le correnti minime, l'*errore di fase* cioè l'errore che il contatore può fare con carico induttivo. La esattezza si corregge spostando il magnete verso il centro del disco o verso l'orlo; la sensibilità si ottiene con delle piccole armature mobili di ottone che tendono a spostare il campo voltmetrico, quando agisce da solo, in modo da renderlo dissimetrico e creare una coppia attiva che tende a far girare il disco, ma senza riuscirvi. Basta allora una piccola frazione d'ampère nel circuito amperometrico perchè il disco si metta a girare. Questo dispositivo corrisponde alle bobine aiuta-campo nei contatori a c. c. Ove vi sia un errore dipendente dal carico induttivo si può correggere lo spostamento della corrente *i* del circuito voltometrico rispetto alla I, mediante degli anelli di filo messi sopra l'avvolgimento stesso.

Tutti i contatori hanno la *costante*, incisa sul cartellino coperchio e che esprime il numero dei giri del disco per ogni chilowatt-ora oppure i watt-ora per ogni giro del disco.

I contatori si costruiscono per determinate intensità, tensioni e frequenze; nelle ordinazioni bisogna quindi tener conto della massima intensità di corrente dell'impianto a cui deve servire il contatore. Un buon contatore comincia a segnare esattamente ad 1/10 del carico massimo in ampère. Variazioni anche forti del 15-30% nella tensione o nella frequenza non dovrebbe produrre errori maggiori del 3-4%. Per misure di grandi intensità o di alte tensioni ai contatori si adattano dei

trasformatori riduttori di corrente e di tensione. Non si può aumentare la portata dei contatori a corrente alternata con applicazione di shunt.

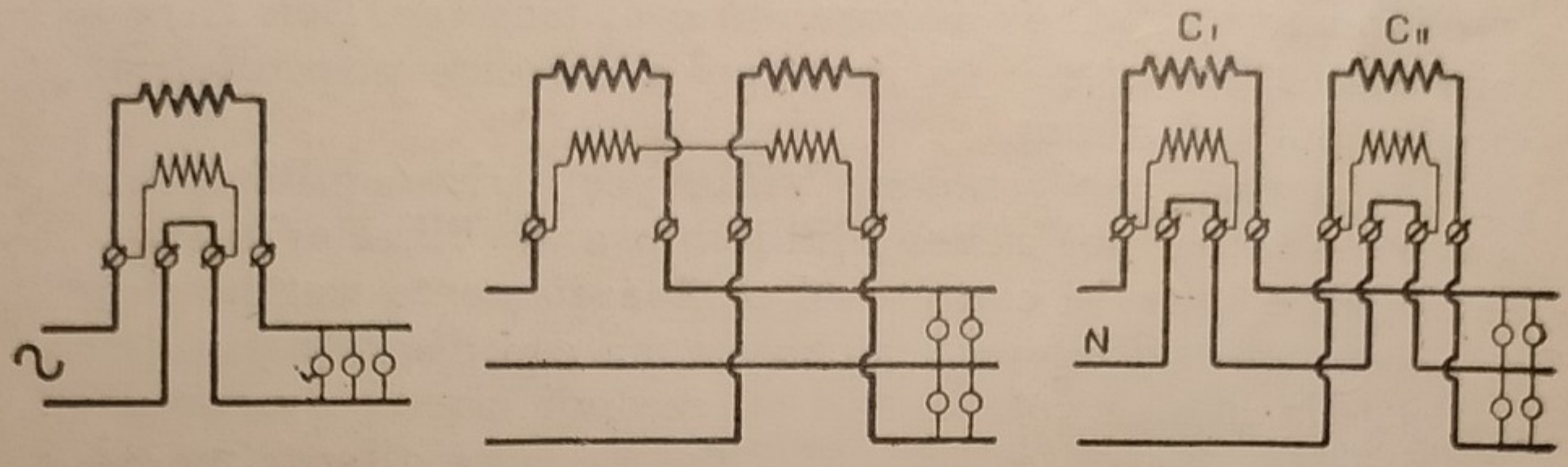
Si costruiscono *contatori trifasi* per carico equilibrato e contatori trifasi per carico squilibrato a tre fili. I primi possono essere costruiti con un sol equipaggiamento wattmetrico cioè sono costruiti come i monofasi ma con disposizione speciale della bobina voltometrica; i secondi invece contengono due equipaggiamenti wattmetrici che agiscono o sopra un sol disco o sopra due dischi posti sullo stesso alberello. Infine si costruiscono contatori trifasi per circuiti a tre fasi con neutro; tali circuiti si possono considerare come tre circuiti monofasi indipendenti e perciò il contatore deve contenere tre equipaggiamenti wattmetrici completi ossia uno per ciascuna fase.

Vi sono infine *contatori differenziali* che segnano i watt-ora soltanto oltre un certo carico (detto il *forfait*) convenuto coll'utente; *contatori a doppia tariffa* che segnano su due quadranti l'energia consumata in due orari della giornata, per esempio di giorno dalle 4 alle 16 e dalle 16 alle 4. Questi contatori contengono un orologio che a determinate ore, variabili a volontà di chi fornisce l'energia, innesta il movimento dell'alberello verticale ora sul contagiri diurno ora sul contagiri notturno.

117. Inserzione dei contatori nei circuiti. — I contatori monofasi portano quattro morsetti di cui due per l'entrata e due per l'uscita fili; l'indicazione relativa agli attacchi è fatta o con lettere o con dei piccoli schemi. Così pure tutti i contatori portano l'indicazione del senso in cui deve ruotare il disco. L'inserzione nei circuiti monofasi si fa come è indicato dalla fig. 204.

Per gli impianti a tre fili si fanno dei contatori che contengono un equipaggiamento wattmetrico ma con due bobine amperometriche. (Fig. 205). Più semplice e più sicuro è l'adoperare per questo caso due contatori a due fili inserendoli nel modo indicato dalla figura 206.

Se il circuito è trifase si possono applicare sia contatori trifasi sia contatori monofasi comuni. Se il circuito trifase è equilibrato (ampère uguali nelle tre fasi) si possono avere



Figg. 204 - 205 - 206 - Inserzione dei contatori in circuiti a due fili con un contatore unico ed a tre fili con due contatori monofasi.

dai costruttori dei contatori speciali con un solo equipaggiamento wattmetrico. Se il circuito è squilibrato allora si possono impiegare due contatori monofasi come alla fig. 207, inserendo le spirali amperometriche in serie sulle fasi 1 e 3 e le spirali voltmetriche tra queste e la fase 2.

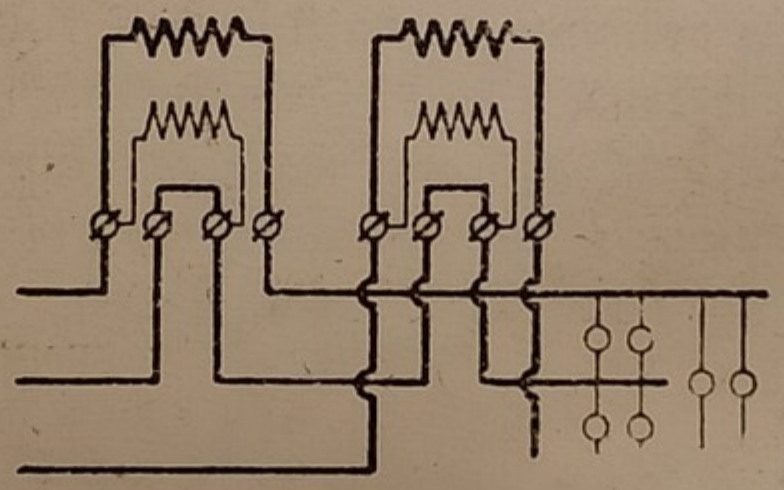


Fig. 207 - Inserzione di due contatori monofasi per misura dei circuiti trifasi non equilibrati a tre fili.

Anzi dalle letture dei due contatori monofasi si può desumere il fattore di potenza medio mediante la regola e la tabella indicata al parag. 113.

Se il circuito trifase è squilibrato e con neutro allora si possono adoperare tre contatori monofasi inseriti come alla figura 208.

Nella inserzione dei contatori si devono usare le stesse prescrizioni che si sono dette pei wattmetri. Così quando si inseriscono dei contatori monofasi o trifasi sopra circuiti trifasi si deve osservare al momento della installazione se caricando separatamente ciascuna fase, il contatore gira nel giusto senso. Per questa esperienza è però necessario che il carico

sia non induttivo o poco induttivo e costituito per esempio da lampadine.

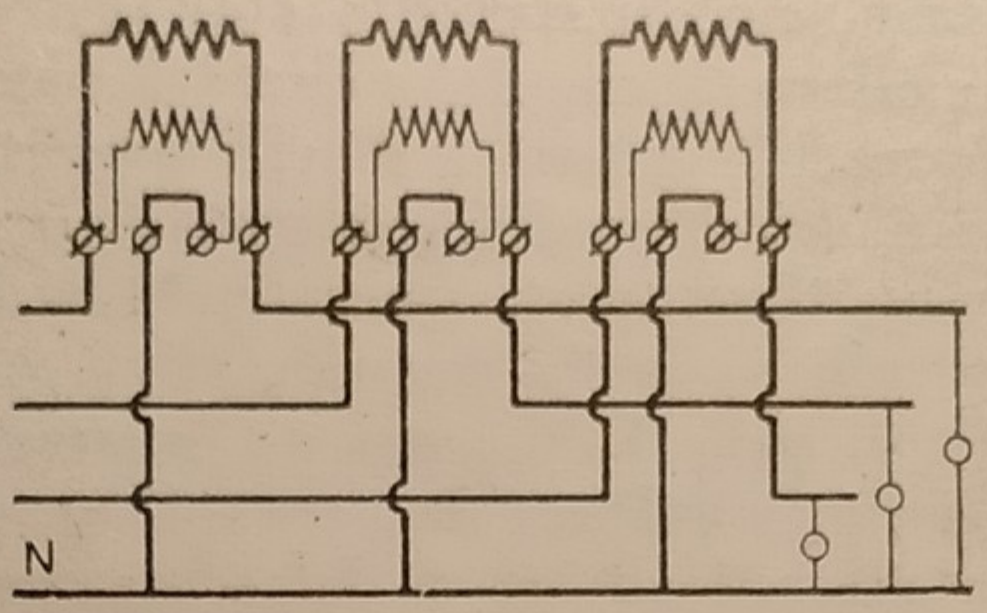


Fig. 208 - Inserzione di tre contatori monofasi per misura dei circuiti trifasi a quattro fili.

118. Verifica dei contatori. — La prova della esattezza si fa inserendo nel circuito, nello stesso modo con cui è attaccato il contatore, un wattmetro di controllo. Con un orologio contasecondi si conta quanti giri n fa il disco del contatore in t secondi. Contemporaneamente si legge l'indicazione del wattmetro e sia Wa. Sia C la costante del contatore e che esprime i *watt-ora per ogni giro del disco*. Allora si fa questo ragionamento: se il disco ha fatto n giri in t secondi, in 3600 secondi — un'ora — avrebbe fatto:

$$3600 \times \frac{n}{t} = \text{N giri}$$

e moltiplicando N per la costante C si hanno i watt-ora all'ora.

Ma noi sappiamo che *lo stesso numero che esprime i watt-ora consumati da un circuito in un'ora esprime anche i watt medi* consumati nell'ora; quindi il numero $Wc = N \times C$ esprime i watt corrispondenti consumati e desunti dal contatore. La differenza $Wa - Wc$ esprime l'*errore assoluto*; tale errore sarà positivo se il contatore ritarda e negativo se il contatore corre troppo. L'*errore percentuale* è dato da:

$$\frac{Wa - Wc}{Wc} = \frac{X}{100}$$

da cui:

$$X = \frac{(Wa - Wc) \times 100}{Wc}$$

Per correggere il contatore si sposta la calamita verso l'orlo del disco, se il contatore corre, o verso il centro se il contatore ritarda, cioè si varia la coppia frenante.

Di solito nelle verifiche dei contatori a mezzo di watt-metri si fanno parecchie letture a diversi amperaggi. Un operatore conta i giri del disco del contatore; un altro legge contemporaneamente il wattmetro prendendo la media di diverse letture a intervalli di pochi secondi.

Se i contatori sono due occorrono quattro operatori.

Quando si vuol giudicare la bontà di un contatore nuovo allora si fa la curva degli errori del contatore corrispondenti ai diversi carichi. Perciò si innesta insieme al contatore e al wattmetro di precisione un amperometro e si determina l'errore percentuale del contatore coi diversi carichi da zero ampère al carico massimo. I risultati si portano come si dice in curva, cioè si portano sopra due assi ortogonali gli ampères di carico (ascisse) e gli errori corrispondenti (ordinate).

Si può disegnare anche una curva degli errori per variazione del voltaggio, per variazione della frequenza, per variazione di sfasamento fra l'intensità e f. e. m.

Un altro sistema per la verifica dei contatori consiste nell'accoppiarli con speciali contatori campioni. Detti contatori portano un bottone per l'avviamento e l'arresto del disco. Per l'accoppiamento del contatore campione col contatore da provarsi si mettono in serie le bobine amperometriche e in derivazione le voltmetriche. Il confronto lo si fa sul numero di giri dei rispettivi dischi.

ESEMPIO. — Un contatore da 5 A e 100 V è installato per la misura di un circuito a 6500 V ed è inserito sul secondario di un trasf. di tensione con rapporto 6500/100 V e sopra un riduttore di corrente 350/5 Amp. Il contatore ha la costante 0,36 watt-ora per un giro di disco.

Inserito un wattmetro di controllo questo segnò 145 W mentre il disco del contatore ha fatto 4 giri in 33 secondi. Si domanda l'errore assoluto e percentuale.

R. — Il disco avrebbe fatto in un'ora:

$$3600 \times \frac{4}{33} = 436 \text{ giri}$$

ed avrebbe segnato: $436 \times 0{,}36 = 156{,}96$ e siccome i rapporti dei

riduttori sono l'uno 65 e l'altro 90: totale 65 × 90 ossia 4550, il contatore avrebbe segnato:

$$156.96 \times 4550 = 714168 \text{ Wh.}$$

Il wattmetro invece ha segnato:

$$145 \times 4550 = 659750 \text{ Wh}$$

ossia il contatore ha segnato in meno:

$$714168 - 659750 = 54418$$

con un errore percentuale del

$$\frac{54418 \times 100}{714168} = 7{,}6 \text{ per cento}$$

119. Frequenziometri. — Questi strumenti sono fondati sul principio della risonanza delle molle diritte vibranti. Nell'istrumento sono allineate orizzontalmente una decina di piccole molle d'acciaio fissate per un estremo su una lastra e libere all'altro estremo di vibrare. (Fig. 209). Le molle hanno una lunghezza crescente oppure portano alla estremità un piccolo peso crescente dall'una all'altra. In tali condizioni

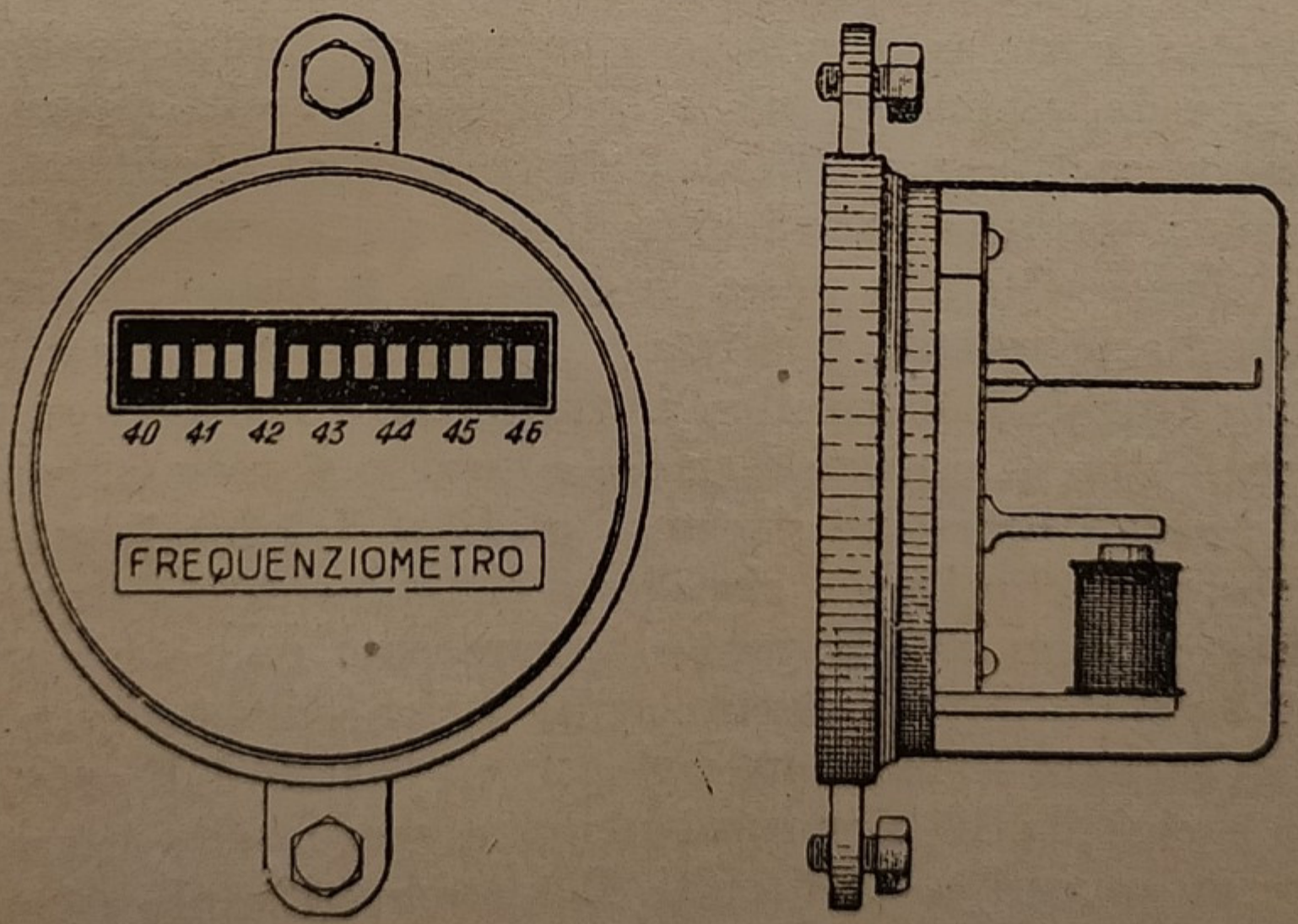


Fig. 209 - Frequenziometro.

ogni molla, sollecitata da una forza, può oscillare con un numero di vibrazioni determinato che dipende dalla lunghezza e dal pesetto applicato alla estremità libera. Se si cambia cioè il peso o la lunghezza varia anche il numero delle vibrazioni.

Sotto alle molle è applicato un elettromagnete percorso da una derivazione della corrente alternata della quale si vuol misurare la frequenza; l'elettromagnete scuote la lastra sulla quale sono fissate le molle. Le molle sono calibrate in modo da oscillare con frequenze poco sopra o poco sotto di quella normale. Siccome ogni molla ha il suo periodo proprio di oscillazione così ciascuna si metterà a vibrare soltanto quando la frequenza del campo magnetico alternativo sarà uguale al detto periodo. Vibrando rapidamente la molla forma una striscia sul davanti e dà quindi l'indicazione della frequenza.

120. Indicatori di massima corrente. — Questi apparecchi segnano il massimo degli ampère consumati in un impianto; conservano cioè la traccia degli ampères massimi raggiunti. Il tipo di indicatore più conosciuto è quello del Wright che serve tanto per corrente continua che per corrente alternata. Esso è basato sulla dilatazione dei gaz ed è formato, come indica la fig. 210, da un tubo curvo ad U, con due rigonfiamenti alle estremità, contenenti un liquido colorato. Sopra uno dei rigonfiamenti o bulbi sono avvolti alcuni giri di un nastro sottile metallico ad alta resistenza specifica. L'altro bulbo porta una derivazione di un tubetto verticale volto verso il basso. Quando passa la corrente il bulbo di sinistra si scalda, l'aria interna si dilata e spinge il liquido nel bulbo di destra finchè il dislivello fa equilibrio alla maggior pressione nel bulbo di sinistra. Parte del liquido si riversa nel tubo centrale e dall'altezza di questo liquido si desume il massimo degli ampères che hanno riscaldato il bulbo di sinistra.

Il funzionamento di questo apparecchio non è istantaneo e lo si è voluto appositamente lento poichè deve servire allo scopo di segnare le massime richieste di corrente di una certa durata e cioè da 10-15 minuti primi e non quelle istantanee causate da piccoli corti circuiti. Per esempio applicati questi indicatori a controllare il consumo di un motore elettrico essi

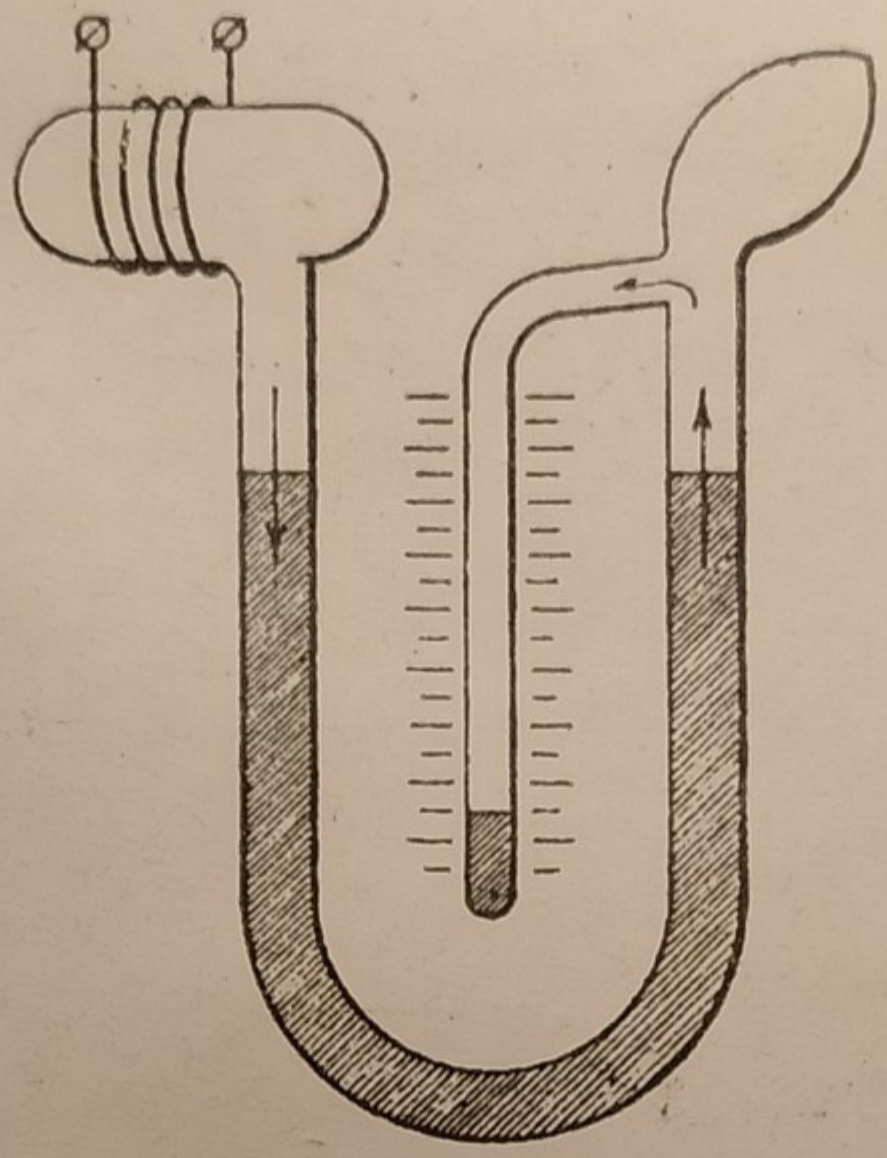


Fig. 210 . Indicatore di massima corrente Wright.

non segnano la maggior corrente che per pochi secondi i motori assorbono al momento dell'avviamento.

L'indicatore di massima tipo Wright serve anche come istrumento base per un sistema di tariffficazione dell'energia.

La casa Siemens costruisce un indicatore di massima applicato a contatori su questo principio: L'alberello verticale del contatore ogni 10 minuti (o più come si desidera) con un giuoco di innesto e disinnesto comandato da un orologio, spinge sopra un quadrante un indice.

Lo spostamento dell'indice sarà più o meno grande a seconda della velocità ossia dei watt. Trascorsi i 10 minuti avviene il disinnesto, ma l'indice rimane fisso a indicare i watt e non si muove finchè una spinta con maggior velocità non lo porta più avanti.

CAPITOLO VII.

Dinamo.

121. Classificazione delle macchine ad induzione. — Le principali macchine elettriche industriali la cui costruzione e funzionamento si basa sul fenomeno della induzione elettromagnetica (paragr. 67) sono:

1.° *Le dinamo e motori a corrente continua.*

2.° *Gli alternatori* o generatori di corrente alternata (monofase, bifase, trifase) ed i motori sincroni.

3.° *I convertitori o converter* da corrente alternata in continua o viceversa.

4.° *I trasformatori* per corrente alternata da alta in bassa tensione o viceversa (statici).

5.° *I motori asincroni* od a campo rotante.

6.° *I convertitori di frequenza asincroni.* (Cap. 12).

Queste sei categorie di macchine si distinguono nettamente fra loro non solo per lo scopo evidentemente diverso; ma anche dal modo con cui si compie il fenomeno induttivo.

1.° Nelle dinamo la corrente è generata mediante l'induzione ottenuta dentro fili stesi lungo le generatrici di un cilin-

dro ruotante e che tagliano le linee dei flussi magnetici, di intensità costante, uscenti dai poli di una calamita o di una elettrocalamita fissa. (Fig. 211). Siccome le correnti generate sono alternativamente in senso contrario nei fili, così le dinamo devono avere un *organo raddrizzatore* delle dette correnti. Se invece si raccogliessero le correnti mediante semplici anelli in comunicazione coi fili si avrebbero delle correnti alternate

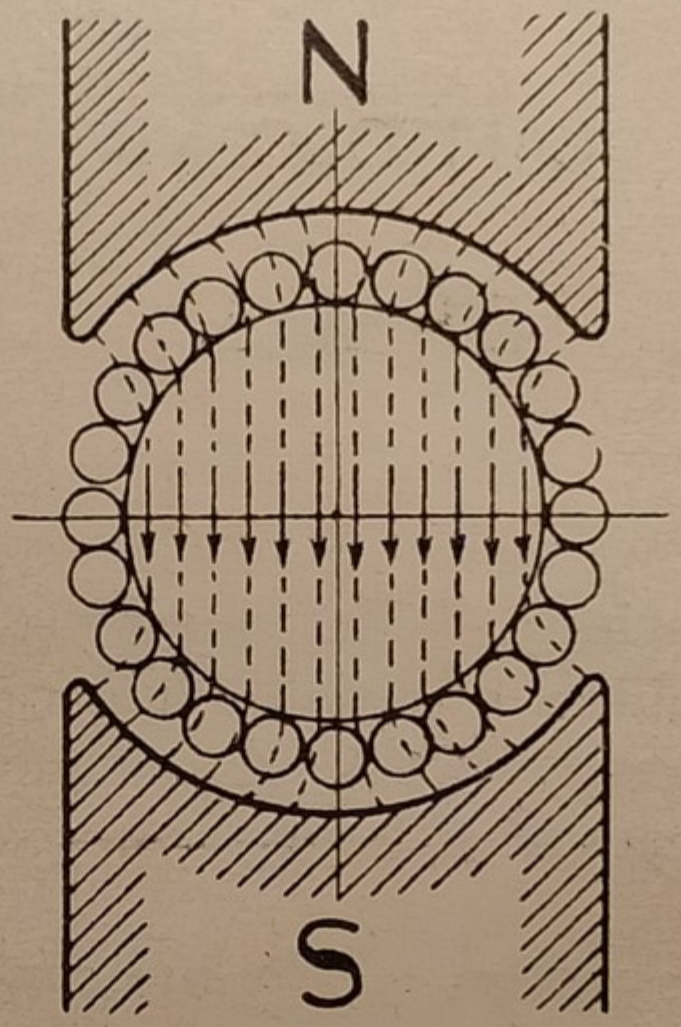


Fig. 211 - Distribuzione del flusso in un indotto di dinamo.

Il flusso magnetico induttore è eccitato da una corrente continua, derivata dai morsetti dell'indotto oppure in serie con questo o infine da una dinamo separata.

2.° Negli alternatori moderni si parte invece dal concetto della induzione mediante variazione del flusso induttore entro

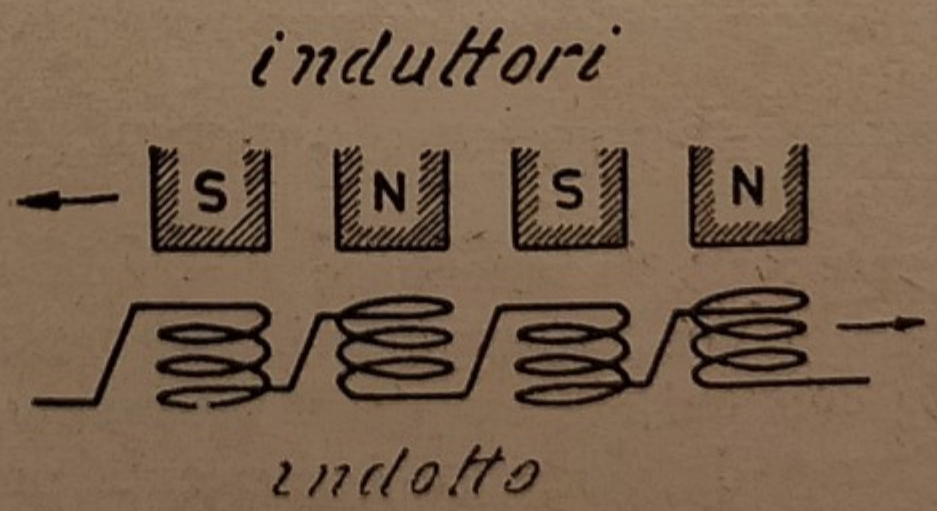


Fig. 212 - Schema di alternatore.

delle spire fissate alla superficie di un anello di ferro. Le variazioni del flusso sono provocate dal movimento di campi induttori o dal movimento del circuito indotto. I motori sincroni hanno la stessa struttura degli alternatori; è cambiata solo la funzione da generatori in motori.

Il flusso magnetico dei poli induttori è come nelle dinamo a polarità fisse ed è eccitato con una corrente continua data da una dinamo separata o eccitatrice.

3.° I convertitori ruotanti sono formati come le dinamo; solo hanno sull'indotto girante due organi raccoglitori di corrente: uno per la continua a lamelle ed uno ad anelli per la corrente alternata. L'induttore è a polarità fisse ed alimentato da corrente continua.

4.° Nei trasformatori statici il fenomeno induttivo si riduce a quello della induzione mutua fra due circuiti A e B concatenati da un flusso alternativo (Fig. 213). Il flusso nel nucleo di ferro è risultante dalle correnti in A e in B (primario e secondario) di magnetizzazione.

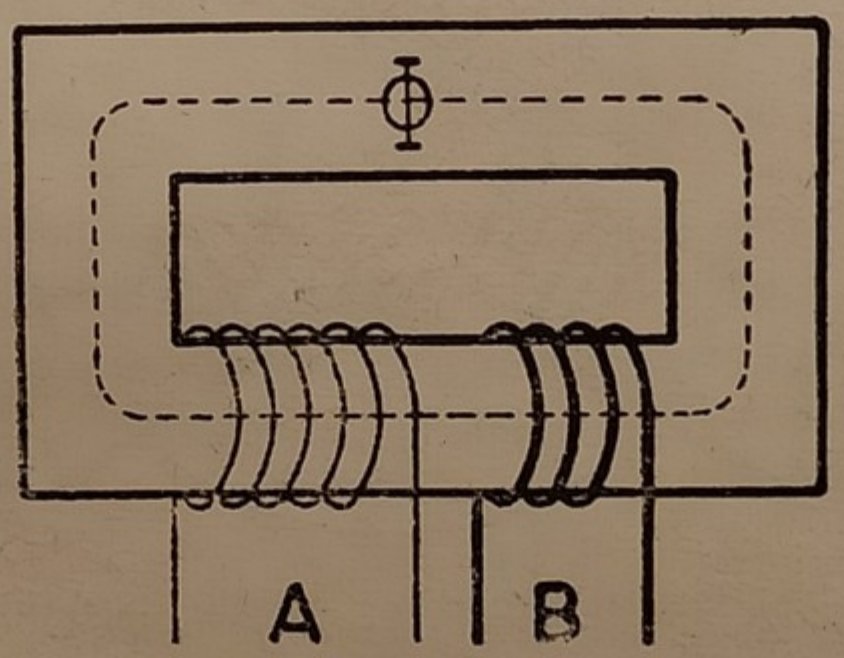


Fig. 213 - Schema di un trasformatore.

5.° Nei motori asincroni si approfitta della induzione di un campo magnetico rotante (parag. 96) per generare correnti alternate in un circuito posto sopra un nucleo girevole di ferro sul quale sono avvolte delle spirali. (Fig. 214).

Riassumendo: in tutte le macchine ad induzione la f. e. m. indotta è *sempre concatenata* ad un flusso magnetico periodicamente variabile ed il cui valore è determinato dalle formole ai parag. 68 - 80 - 82.

Tale flusso o tali flussi sono creati:

a) nella classe di macchine 1 - 2 - 3 da una ruota di poli a polarità fissa determinata da una corrente continua detta di eccitazione e regolabile a volontà;

b) nella classe di macchine 4 - 5 - 6 dalla componente della corrente alternata di alimentazione detta componente reattiva o di magnetizzazione (parag. 82).

Il circuito indotto è sempre avvolto entro nuclei o sopra nuclei a ferro lamellare perchè le correnti indotte sono sempre alternative. Nel caso *a*) la corrente indotta è provocata dalla rotazione del flusso induttore rispetto al circuito indotto o viceversa. Nel caso *b*) la corrente indotta è provocata dalla variazione del flusso induttore alternativo, prodotto dalla corrente stessa di alimentazione, nel nucleo di ferro dell'indotto.

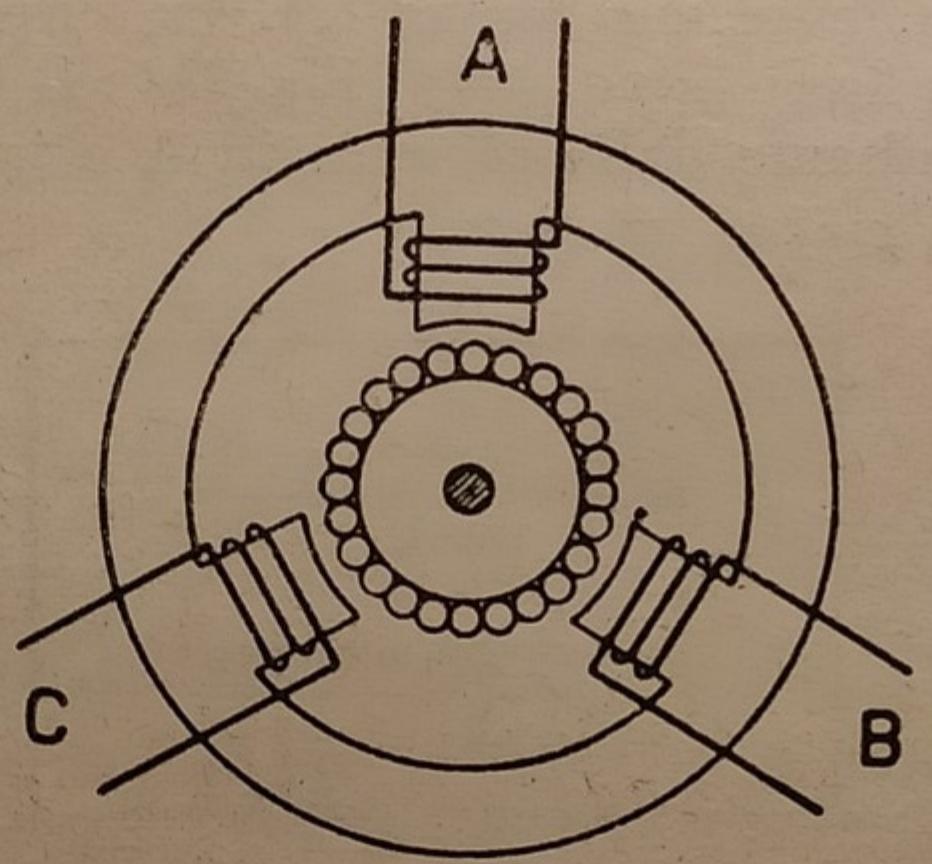


Fig. 214 - Schema di motore asincrono trifase a campo rotante.

122. Legge generale delle macchine a induzione. — Chiamiamo Φ il flusso magnetico induttore di una macchina bipolare; F il numero dei fili o delle spire del circuito indotto; E la forma elettromotrice applicata alla macchina; *n* il numero dei giri (dell'induttore o dell'indotto a seconda che l'uno o l'altro forma il sistema girevole); *f* la frequenza.

La legge generale delle macchine elettriche ad induzione descritte nel parag. precedente è la seguente: *la f. e. m.* E *indotta è proporzionale al prodotto del flusso* Φ, *per il numero dei*

fili F *e per il numero dei giri n, oppure per la frequenza.* Chiamando K un coefficiente di proporzionalità si ha quindi, riferendosi alla classificazione precedente:

(1) $E = K \times n \times F \times \Phi \times 10^{-8}$ per le macchine 1-2-3

(2) $E = K \times f \times F \times \Phi \times 10^{-8}$ per le macchine 4-5-6

La legge vale tanto per i generatori che pei motori.

In seguito esamineremo il valore di K pei diversi casi. *Questa legge importantissima è da tenersi ben salda nella mente degli elettricisti perchè serve a spiegare il comportamento delle macchine elettriche al variare di* E, *n*, *f*, Φ. Come già si è detto il flusso Φ è creato o da una corrente continua o dalla componente reattiva in ritardo di 90° della corrente alternata.

Ecco ad esempio alcune deduzioni pratiche della legge generale delle macchine ad induzione.

1.° Nelle classi di macchine indicate coi numeri 1, 2, 3 del paragrafo precedente supposto costante il numero di giri *n*, essendo F per ogni macchina un numero invariabile, la f. e. m. E prodotta dalla macchina è proporzionale al flusso Φ ossia alla corrente di eccitazione, tenuto conto della saturazione del ferro.

2.° Nelle macchine a corrente continua considerate come motori, se E e F sono costanti, aumentando Φ deve di altrettanto abbassarsi il numero di giri *n* e viceversa, cioè accitando di più il campo la velocità diminuisce.

3.° Nella stessa classe di macchine se Φ è costante e quindi la corrente di eccitazione, la f. e. m. E è proporzionale a *n*.

4.° Nella classe di macchine 4, 5, 6 essendo sempre F costante e mantenendo E costante, dalla seconda formola balza evidente che se *f* cresce, di altrettanto deve calare Φ e viceversa. Cioè la componente di magnetizzazione cresce o cala (cioè si peggiora o si migliora cos φ) a seconda che cala o cresce la frequenza *f*.

5.° Nella stessa classe di macchine 4, 5, 6 se cresce E, mantenendo *f* costante dovrà crescere Φ e quindi la corrente di

magnetizzazione, la quale essendo in ritardo di 90° rispetto alla tensione, provocherà un peggioramento del fattore di potenza. Se E diminuisce anche Φ diminuisce.

6.° Nella classe delle macchine 1, 2, 3 se ad una di esse si cambia l'avvolgimento e cioè si varia F mantenendo costante *n*, Φ varierà proporzionalmente E. Nelle macchine delle classi 4, 5, 6 variando il numero delle spire d'avvolgimento indotto, se *f* e Φ si devono mantenere costanti si deve variare in proporzione la tensione E. Se invece si tiene costante anche E varierà in senso inversamente proporzionale il flusso Φ e quindi l'induzione nel ferro e la componente di magnetizzazione della intensità.

Per queste deduzioni che si possono fare dalle leggi fondamentali delle macchine elettriche bisogna però ricordare che il flusso Φ non è sempre proporzionale alla corrente di eccitazione o di magnetizzazione per la presenza del ferro nei nuclei magnetici. Noi abbiam visto infatti (parag. 59) che il flusso Φ segue una variazione conforme alle curve di magnetizzazione e solo nel primo tratto di queste curve il flusso Φ è proporzionale alla corrente di eccitazione.

Nelle macchine elettriche si verificano anche dispersioni di flusso che sono crescenti col valore della densità B delle linee di forza. Perciò ad esempio nei generatori della classe 1 - 2 (dinamo o alternatori) la f. e. m. E non è sempre proporzionale alla corrente di eccitazione ma cresce in proporzione sempre minore. Anche nei trasformatori e motori asincroni o a campo rotante se si eleva E essendo *f* costante, la componente di corrente magnetizzante cresce in proporzione sempre maggiore di E perchè avvicinandosi alla saturazione del ferro occorre una forza magnetizzante sempre più forte.

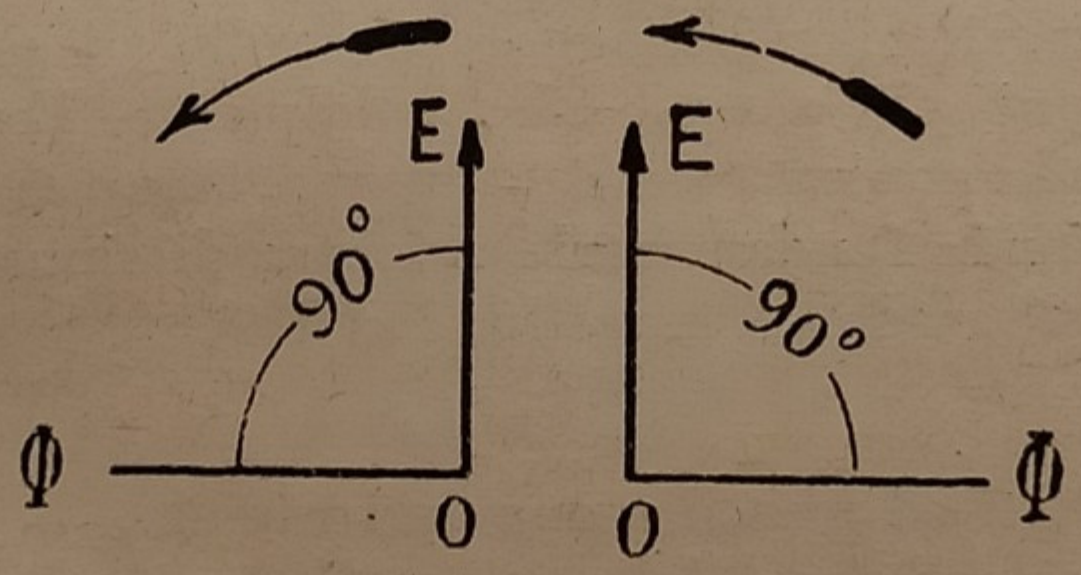
Si osserva infine che la f. e. m. E considerata nelle due formole, esprime *quella interna delle macchine;* essa è alquanto diversa dalla *tensione* V applicata ai morsetti, poichè una parte di questa viene assorbita dalla resistenza ohmica del circuito indotto e dalla induttanza. La tensione V ai morsetti dei generatori è uguale ad E meno la caduta interna attiva e reattiva dei conduttori. Viceversa la tensione V ai morsetti dei *motori* è uguale ad E più la caduta dei conduttori interni.

Di tutti questi fenomeni sarà data spiegazione dettagliata nei capitoli speciali riguardanti le singole macchine.

La *potenza dei generatori* segnata sulle targhette esprime la potenza della energia elettrica prodotta. Invece la targhetta dei motori esprime la potenza meccanica che possono dare usando come unità gli HP. (75 chilogrammetri al 1").

E' interessante di definire la differenza essenziale fra generatori e motori.

E' noto che le dinamo, gli alternatori sono *reversibili* cioè possono passare dallo strato di *generatori* di energia a quello di *motori* ossia assorbitori di energia elettrica e datori di forza meccanica e ciò senza cambiare segno alla tensione V ai morsetti. La differenza fra i due comportamenti sta in ciò: nei *generatori* la f. e. m. indotta nei circuiti interni dell'armatura è maggiore in ogni istante alla tensione V ai morsetti; e la direzione in ogni istante della corrente è dal + al — esternamente. Nei *motori* la f. e. m. indotta (che si distingue col nome di *forza controelettromotrice*) è minore della tensione applicata ai morsetti; perciò la corrente ha in ogni istante direzione contraria a quella di prima e cioè va dal polo + al polo — passando internamente al circuito indotto.



Figg. 215 - 216 . Vettori del flusso magnetico e della f. e. m. indotta nei generatori e nei motori.

123. Flusso, f. e. m., intensità negli indotti a corrente alternata. — In tutte le macchine elettriche in cui si produce una f. e. m. alternativa questa viene generata in avvolgimenti a matasse che abbracciano flussi magnetici alternativi. La f. e. m. che si suscita nell'interno delle matasse è massima nell'istante in cui il flusso passa per lo zero (mo-

mento di massima variazione); ed è zero quando il flusso è massimo. Perciò i vettori che rappresentano il flusso Φ e la f. e. m. interna, concatenati fra loro sono spostati di 90° fra loro. Se l'avvolgimento è *generatore* di f. e. m. allora il vettore del flusso è in anticipo di 90°. (Fig. 215). Se l'avvolgimento è *ricevitore* allora il vettore del flusso è in ritardo di 90° rispetto a quello della f. e. m. (Figura 216).

Il flusso magnetico nelle macchine delle classi 4 - 5 - 6 è dato da una componente della corrente (detta corrente magnetizzante) in fase con esso; tale componente segue le leggi (e si calcola colle formole) del parag. 82; il suo vettore è sempre coincidente con quello del flusso e perciò spostato di 90° rispetto alla f. e. m. indotta e rispetto alla corrente *attiva*. La corrente indotta risultante e che si può misurare ai morsetti del circuito indotto è formata dalle due componenti ad angolo retto: corrente magnetizzante o reattiva e corrente attiva o wattata. L'angolo di fase rispetto alla f. e. m. dipende dalla grandezza delle due componenti.

Siccome la forma delle ondulazioni della f. e. m. derivano dal flusso e sua variazione così per ottenere onde a forma di perfetta sinusoide occorrerebbe che il flusso avesse pure variazione sinusoidale. Ma se i nuclei di ferro nel cielo di magnetizzazione raggiungono lo stadio di saturazione, il flusso non può più variare sinusoidalmente. Esso prende la forma di onde appiattite e si comporta come se fossero composte di un'onda fondamentale a forma di sinusoide e di armoniche di 3° grado. (Parag. 75, fig. 124).

124. Parti di una dinamo industriale. — Una dinamo industriale si compone delle seguenti parti:

1.° Di un *sistema induttore* o *campo magnetico* fisso formato da nuclei di ferro, ghisa, acciaio avvolti con filo in modo da costituire dei *circuiti magnetici chiusi* coll'indotto. La fig. 217 rappresenta diverse forme di dinamo. Si dicono *poli*, *espansioni polari* le parti del circuito magnetico che abbracciano l'indotto. Il sistema induttore fa corpo col basamento.

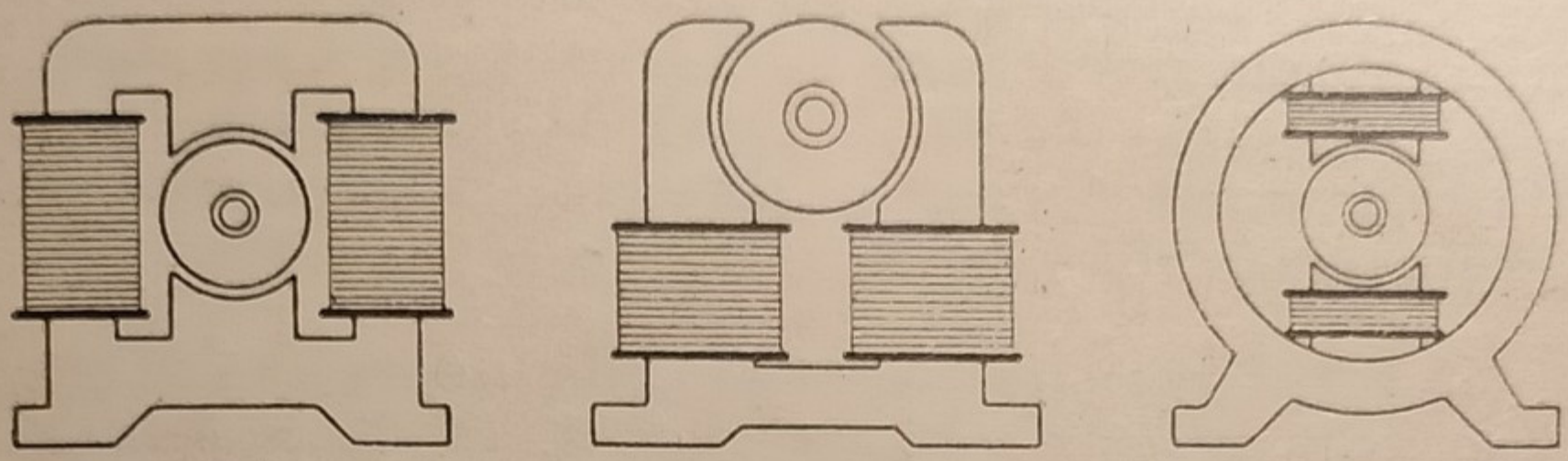


Fig. 217 - Forme di dinamo bipolare.

2.° Di un *indotto od armatura girevole* formata da un nucleo cilindrico od ad anello, di ferro dolce lamellare, fissato solidamente sopra l'albero della macchina. Sul nucleo sono avvolti dei conduttori a filo od a sbarre, accuratamente isolati da nuclei di ferro ed uniti fra loro nei modi che esamineremo. Questi conduttori costituiscono l'*avvolgimento* dell'armatura e sono suddivisi in *matasse* le cui estremità fanno capo al collettore. (Fig. 218).

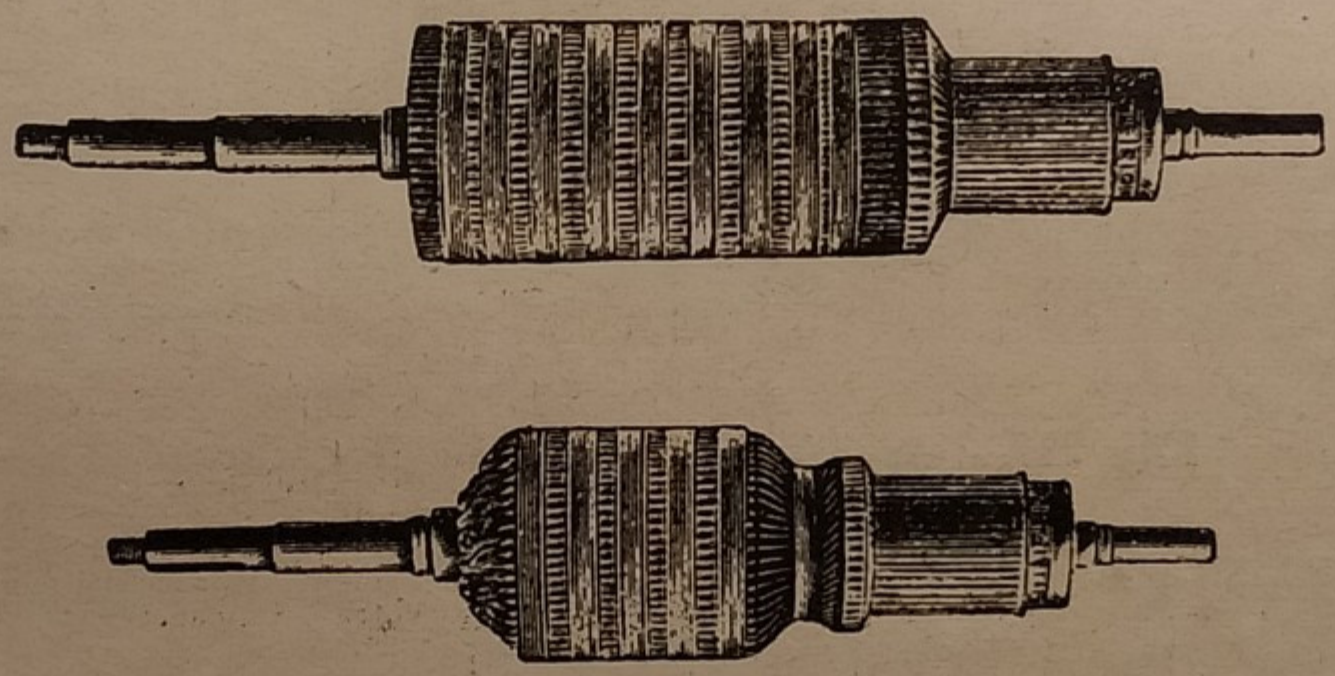


Fig. 218 - Forme di indotti per dinamo.

3.° Di un *collettore a lamelle di rame* che serve a raccogliere le correnti indotte in una unica direzione e cioè di ottenere una corrente continua. Le lamelle sono isolate fra loro con mica; a ciascuna lamella si attaccano due estremità di due matasse.

4.° Sul collettore si appoggiano le *spazzole* fisse che strisciando sulle successive lamelle esportano le correnti indotte sotto forma di una corrente continua. Le spazzole si facevano

una volta metalliche cioè con un mazzo di sottili lamelle di rame; attualmente si fanno esclusivamente con blocchetti di carbone grafitico artificiale. Questi blocchetti sono portati dai *portaspazzole*, studiati in modo che si possa regolare la pressione delle spazzole sul collettore.

5.° Tutti i portaspazzole sono infilati sopra aste di ottone fissate sopra un *anello o arco*, coassiale all'albero dell'armatura, in modo che spostando l'anello si sposta la posizione di tutte le spazzole sul collettore. (Fig. 219). Si dice anche *arco portaspazzole*.

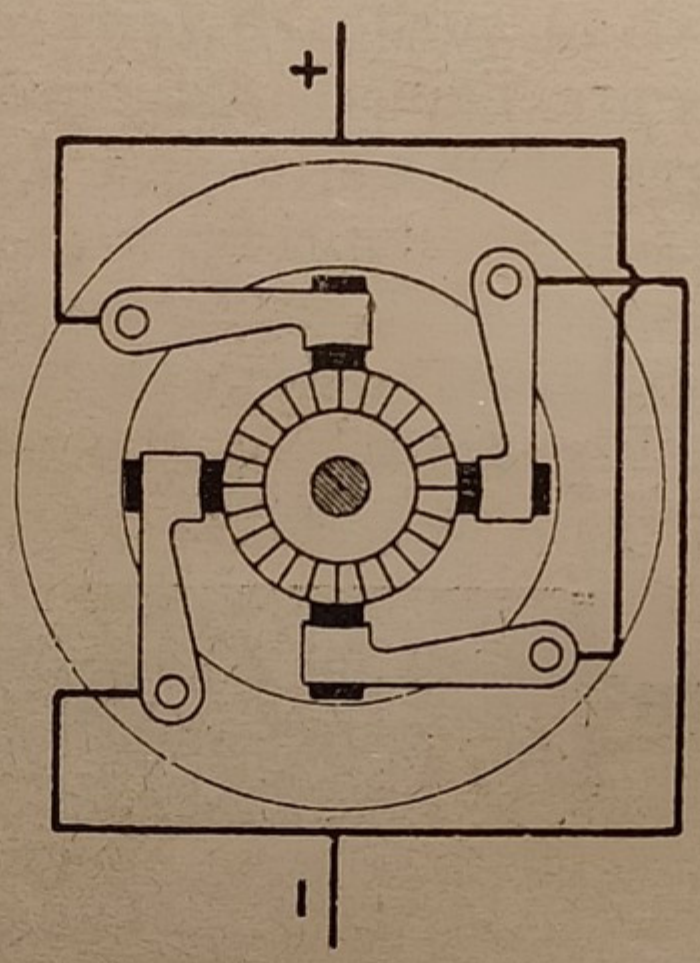


Fig. 219 - Arco con 4 spazzole di carbone.

6.° L'albero dell'armatura gira su due supporti di ghisa a lubrificazione automatica con anelli.

7.° Completano la dinamo il basamento di ghisa, la puleggia, i morsetti per gli attacchi dei circuiti, una corona di palette ventilatrici applicate talvolta alla armatura per ottenere una ventilazione ed un raffreddamento energico.

I morsetti delle dinamo sono quasi sempre quattro: due per le spazzole e due per il circuito di eccitazione del campo magnetico.

Le dinamo possono essere a due poli oppure multipolari.

Lo stretto spazio d'aria che si deve lasciare fra le espansioni polari e l'armatura girevole si dice *interferro*.

L'eccitazione degli elettromagneti del sistema induttore si ottiene con della corrente continua presa da un'altra dinamo oppure con della corrente presa dall'armatura della stessa macchina. Nel primo caso le dinamo si dicono ad *eccitazione indipendente*; nel secondo caso si dicono *auto-eccitatrici*.

125. Principio di funzionamento delle dinamo. — La costruzione delle dinamo, apparse fra il 1832 e 1860, storicamente ha preceduto la teoria. Sia per la novità, sia per la importanza che le nuove macchine andavano assumendo nel campo delle applicazioni, esse diedero motivo da parte degli inventori di una infinita varietà di forme di indotti e di induttori. Ma collo studio approfondito e col perfezionarsi della teoria le forme costruttive si ridussero a pochissime.

Nelle moderne dinamo il campo magnetico induttore è fisso, mentre l'*indotto od armatura* è girevole insieme al collettore.

Per capire il loro funzionamento, riduciamo queste macchine alla espressione più semplice di una *dinamo elementare* e cioè di una spira ruotante in un campo magnetico. Le due figure 220 e 221 rappresentano due dinamo elementari l'*una ad anello* o *tipo Pacinotti-Gramme*, e l'altra a cilindro od a tamburo, o tipo *Siemens*. In entrambi abbiamo una spira che scorre sopra od insieme ad un nucleo di ferro. Questo nucleo

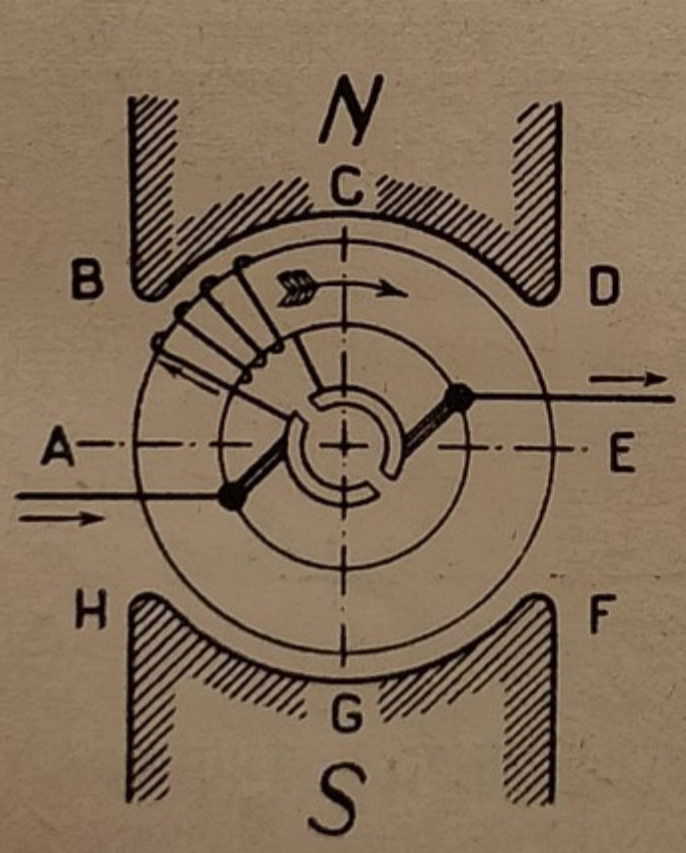


Fig. 220 - Schema di indotto ad anello o Pacinotti-Gramme.

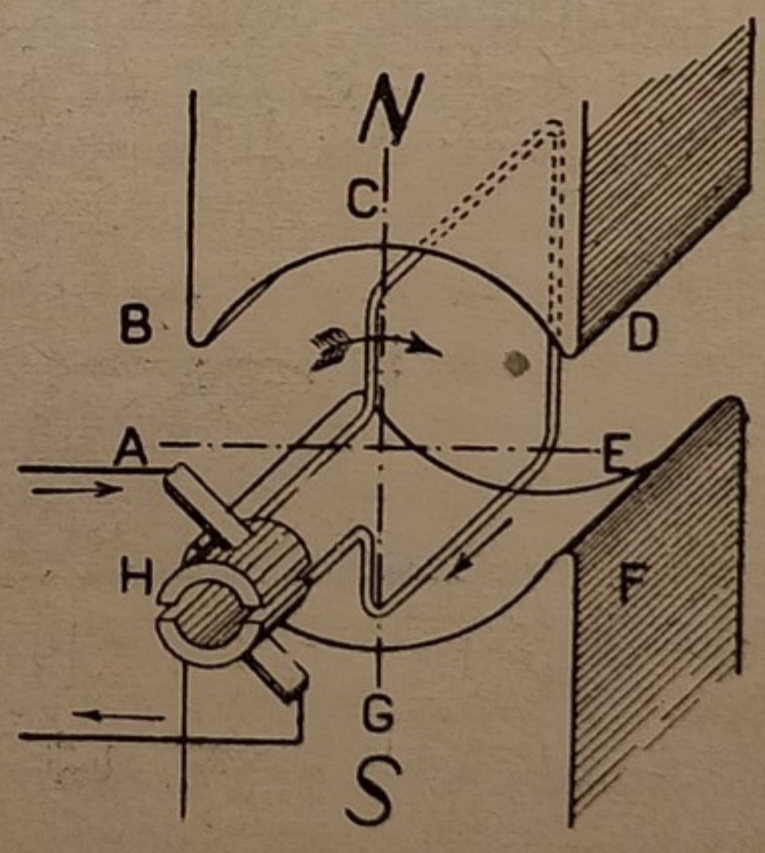


Fig. 221 . Schema di indotto a cilindro o Siemens. (senza il nucleo).

ad anello od a tamburo serve a riempire di ferro lo spazio fra i poli N e S induttori ed a ridurre l'enorme resistenza magnetica o riluttanza. Nelle dinamo ordinarie, stante le gravi difficoltà di ordine meccanico di far girare le spire dell'indotto all'interferro fra il nucleo interno e le *espansioni polari* N e S si fa ruotare con esse il nucleo di ferro colle spirali. Il nucleo deve essere lamellare per evitare le correnti di Foucault.

Ricorderemo infine che in tutti i fenomeni di induzione la forza elettromotrice indotta è proporzionale in ogni istante al numero delle linee di forza tagliate al 1" dalle spire.

Seguendo il movimento, vediamo che la spira nelle posizioni AE, tra i due poli, non taglia nessuna linea di forza quindi la f. e. m. sarà in quella posizione zero. Avvicinandosi alla punta polare B si cominciano a tagliare le linee di flusso e quindi la f. e. m. comincierà a crescere. Sotto all'arco del polo N induttore il flusso abbracciato varia fortemente da B a D poichè il campo magnetico dell'interferro ha quasi costante intensità.

Dalla posizione D alla posizione E la variazione di flusso ed il taglio del medesimo viene a cessare perciò la f. e. m. diventerà zero come in A.

Continuando nel suo movimento sotto al polo S, la spira ripete lo stesso ciclo, ma con una f. e. m. diretta in senso contrario per la legge sulla direzione delle correnti indotte.

L'andamento della f. e. m. si può rappresentare col diagramma della fig. 222 in cui le ascisse sono proporzionali agli spazi percorsi dalla spira e le ordinate alla f. e. m. istantanee.

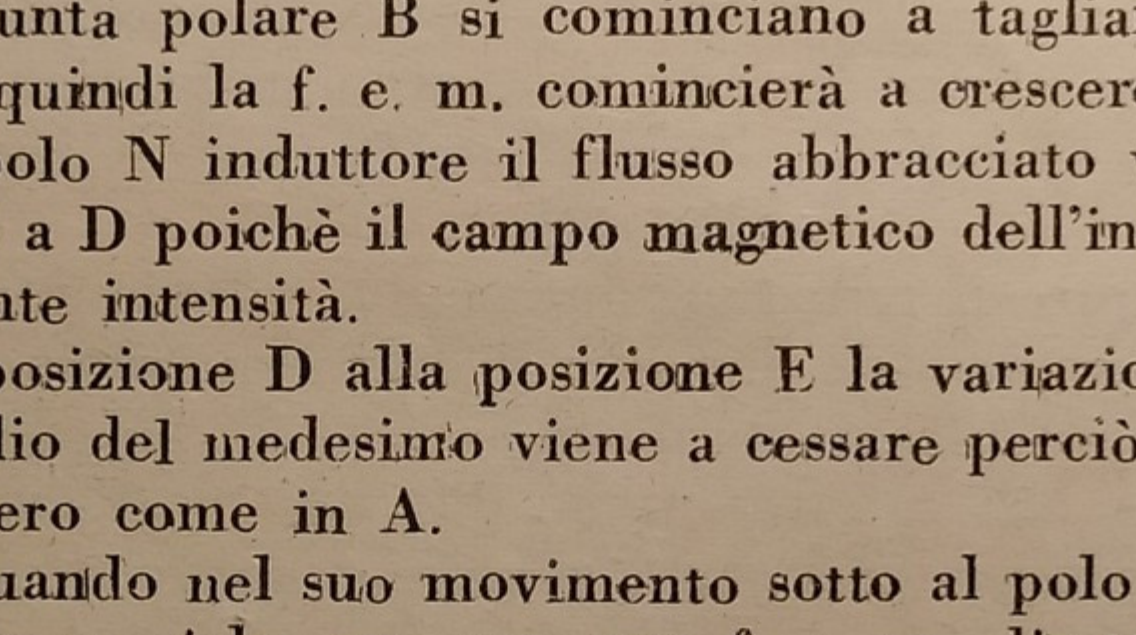


Fig. 222 - Diagramma della variazione della f. e. m. in ogni conduttore indotto di dinamo.

La curva ABCDE ecc. è diversa da dinamo a dinamo a seconda della distribuzione del flusso sotto le espansioni polari. Se il campo magnetico sotto l'arco polare AE invece che costante avesse una densità variabile secondo una legge sinusoidale, la f. e. m. indotta sarebbe una sinusoide. (Fig. 223).

Il primo diagramma però della fig. 222 è quello che più corrisponde alle ordinarie dinamo.

126. Collettore o commutatore. — Seguendo nel suo movimento di rotazione la piccola spirale di una dinamo elementare ad anello (fig. 220) o la grande di una dinamo a tamburo (fig. 221), si osserva che nel passare per le posizioni A-E la f. e. m. diventa zero e che il senso della corrente nella spira si inverte.

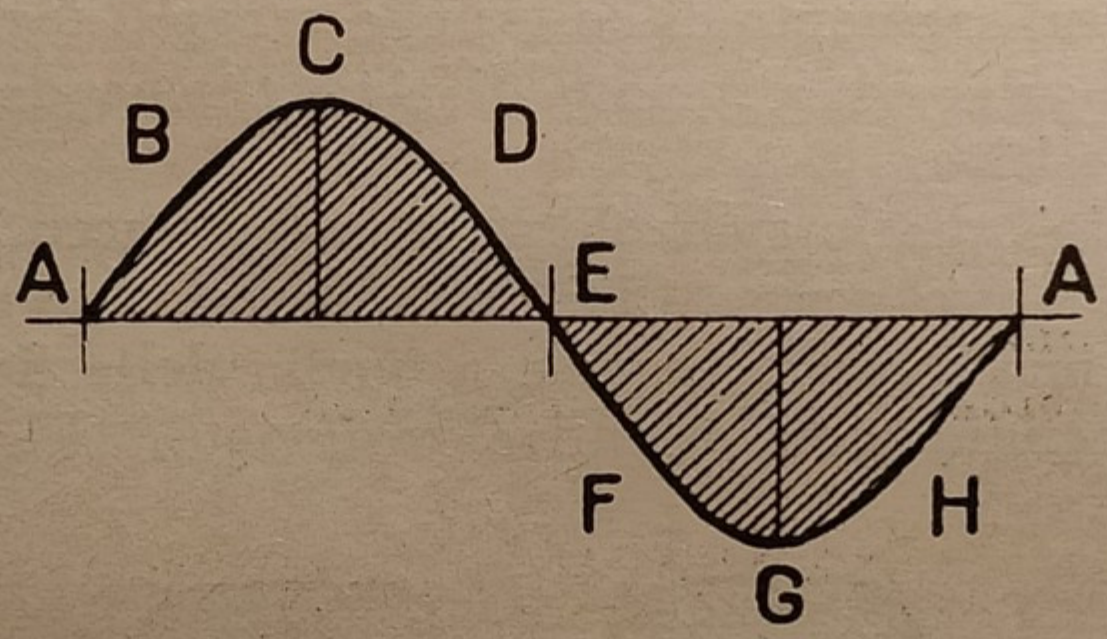


Fig. 223 - Diagramma della f. e. m. se la distribuzione del flusso fosse fatta secondo la legge sinusoidale.

La retta *AE* si dice l'*asse neutro* del campo ed il piano passante per questo asse e perpendicolare al flusso magnetico si dice *piano di commutazione* perchè le correnti indotte nei fili di avvolgimento passando in quel piano si invertono di direzione.

Lo scopo del *collettore o commutatore* delle dinamo è quello di far in modo che le correnti indotte possano essere raccolte dalle spazzole e inviate nel circuito esterno, sempre nella medesima direzione. Il collettore usato è quello a lamelle e per spiegarne il funzionamento ricorriamo alla dinamo elementare. Il collettore di questa dinamo è formato da due segmenti di anello ai quali sono attaccate le estremità della spira. Le spazzole si devono appoggiare esattamente sullo

spacco fra i due mezzi anelli quando la spirale si trova nella posizione dell'asse neutro. (Fig. 224). Fissate in questa posizione le spazzole osserviamo che i due segmenti di anello proprio nel passare per essa cambiano di polarità. Contemporaneamente le spazzole scambiano i piani d'appoggio e cioè la spazzola superiore che prima del passaggio dell'asse neutro

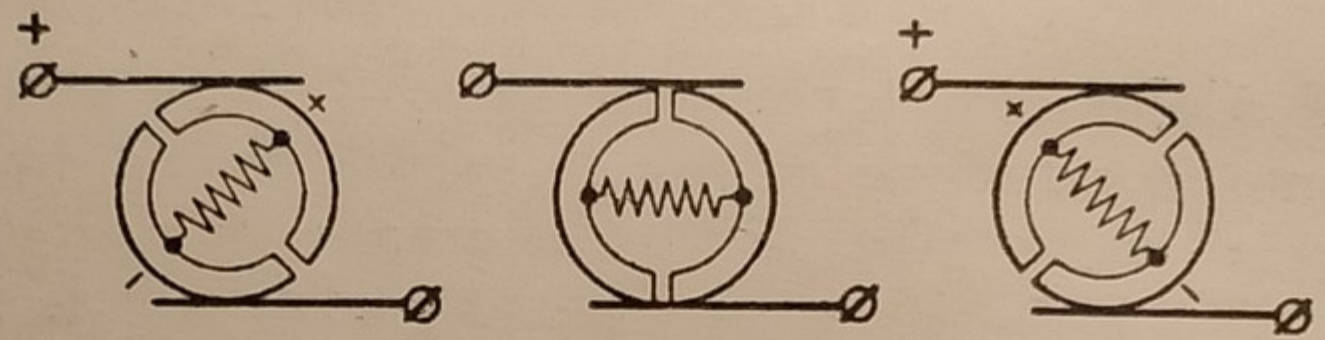


Fig. 224 . Commutazione della corrente sotto le spazzole.

appoggiava sul segmento di destra che aveva il segno +, dopo, essa si appoggia sul segmento di sinistra che da negativo è passato a positivo.

– Si ha cioè che le spazzole ritornano a raccogliere la corrente nello stesso senso. Cioè nel filo esterno avremo una f. e. m. ed una corrente uguale a quella delle fig. 222 e 223 ma con le ondulazioni negative rovesciate. (Fig. 225, 226).

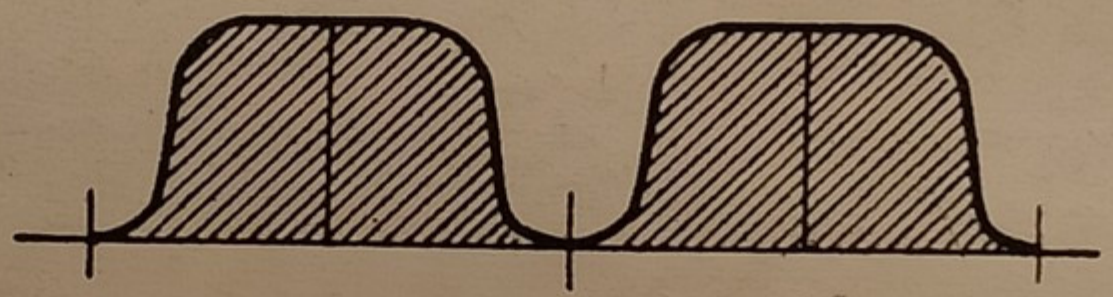


Fig. 225. - Correnti pulsanti raccolte dalle spazzole sopra un collettore a due segmenti.

La corrente così raccolta dalle spazzole non sarà una vera corrente continua e costante, ma una successione di *correnti pulsanti* in una medesima direzione.

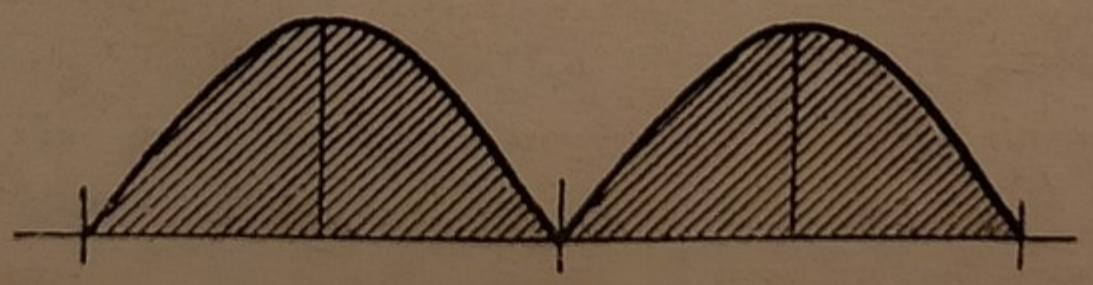


Fig. 226. - Correnti pulsanti sinusoidali ossia correnti alternate raddrizzate.

Il collettore a due sole lame si impiega praticamente per certe piccolissime dinamo; invece nelle dinamo ordinarie il collettore è a più lamelle perchè l'avvolgimento si fa a più spire le quali ricoprono tutta la superficie dell'anello o del cilindro.

Nella fig. 227 è rappresentato un indotto ad anello avente 4 spirali collocate ad angolo retto con 4 lame al collettore. In due spire consecutive 1 e 2 si svolgono per induzione

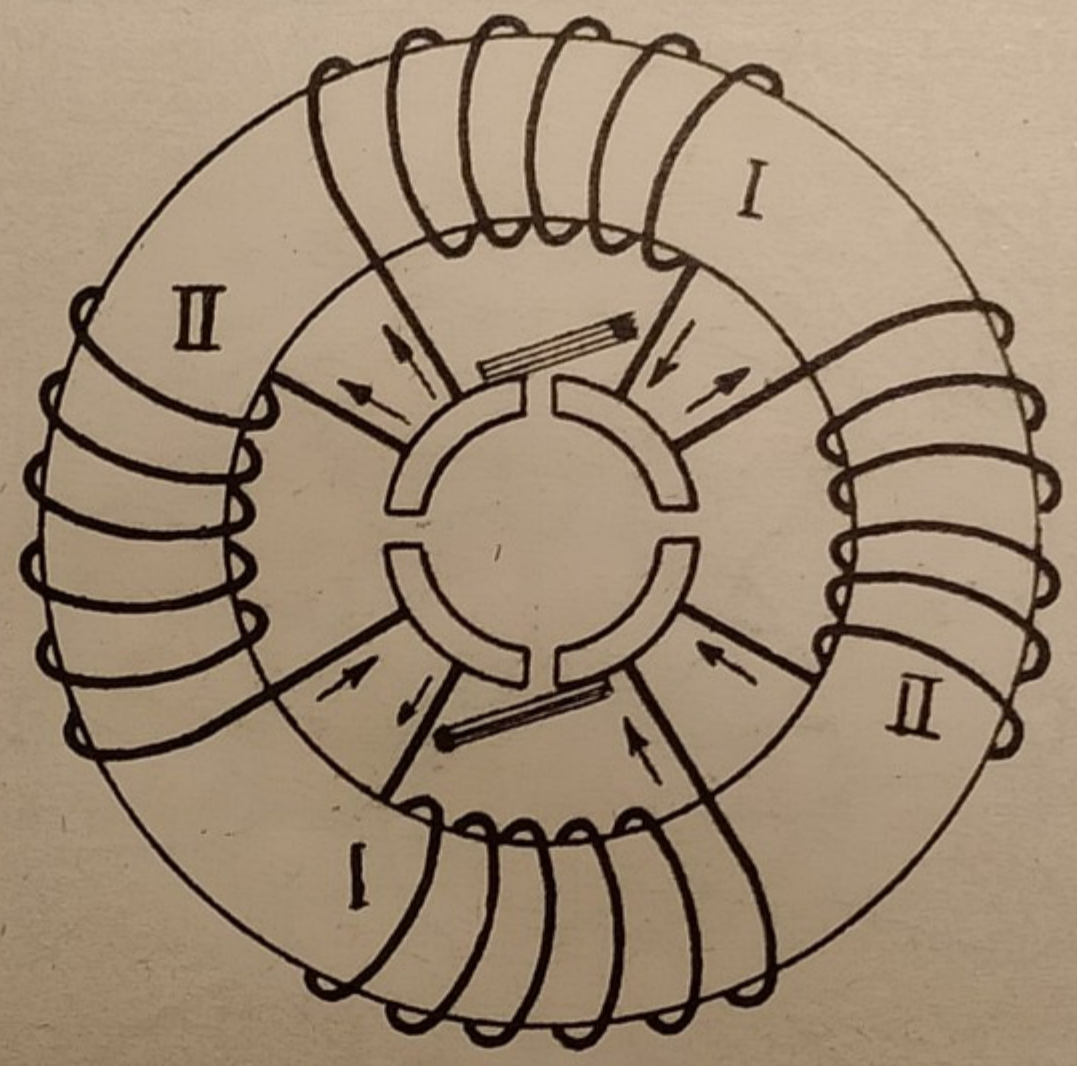


Fig. 227 - Indotto a 4 sezioni e con 4 segmenti di collettore.

due correnti alternate ma spostate di fase di 90° ossia correnti bifasi. Essendo però le due spirali collegate nella dinamo della succitata figura in serie, le forze elettromotrici di due spire rispetto alle spazzole si sommano.

La fig. 228 rappresenta la f. e. m. occorrente che si raccoglie alle spazzole. La corrente 1 tratteggiata è quella di

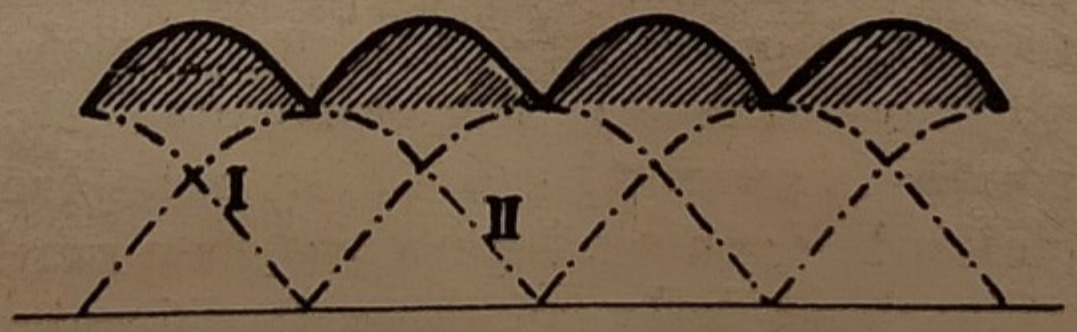


Fig. 228 - Correnti raccolte sopra un collettore a 4 segmenti.

una delle spire; la 2 è quella che si genera nella seconda spira in serie. La linea ondulata nera continua rappresenta la effettiva tensione o corrente che si svolge nelle spazzole.

Se invece di 4 spire si mettono 6, 8 spire in serie con altrettante lamelle al collettore, tra le due spazzole andranno sommandosi tutte le f. e. m. nelle spire comprese fra i punti di contatto delle spazzole, la f. e. m. risultante sarà una corrente continua praticamente costante.

La fig. 229 rappresenta l'indotto di una dinamo a 16 spire con 16 lamelle al collettore.

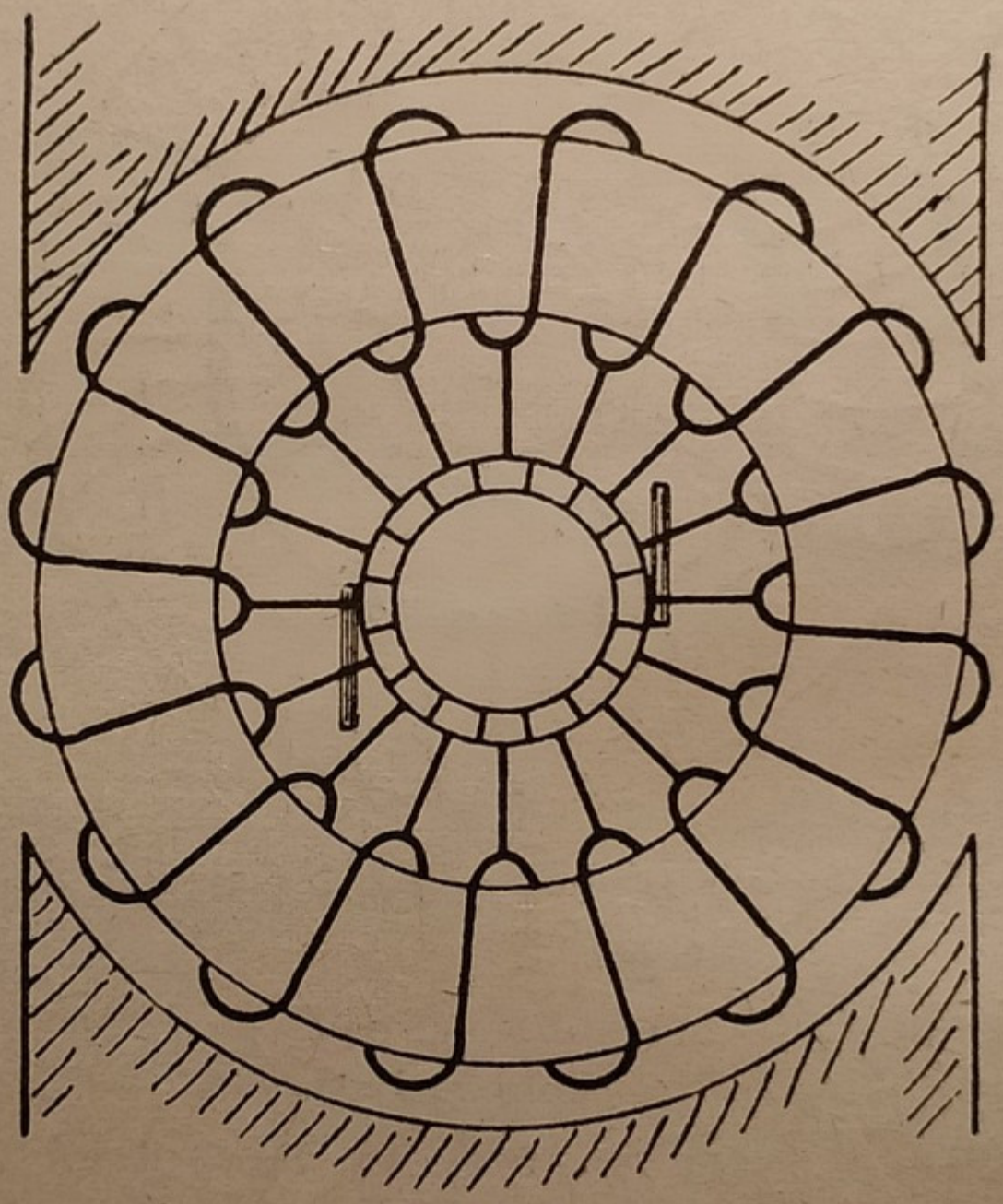


Fig. 229 - Indotto con 16 sezioni ad anello e 16 lame di collettore.

Si osserva inoltre che *nell'indotto delle dinamo la corrente di ciascuna spazzola si bipartisce in due metà di cui una passante sotto al polo nord e l'altra sotto al polo sud.*

Si osserva che durante la rotazione dell'indotto delle 16 spire, 8 si trovano sempre al polo N in serie fra loro e 8 si trovano sotto al polo S; in ogni spira passante per l'asse neutro si inverte la direzione della corrente. Le 16 spire si comportano come altrettanti elementi di pila in serie divisi in due

gruppi, essendo ciascun gruppo in parallelo rispetto al circuito esterno. (Fig. 230).

La f. e. m. fra due spazzole sviluppata dalle spire sotto al polo nord fa equilibrio esattamente alla f. e. m. delle spire sotto al polo sud.

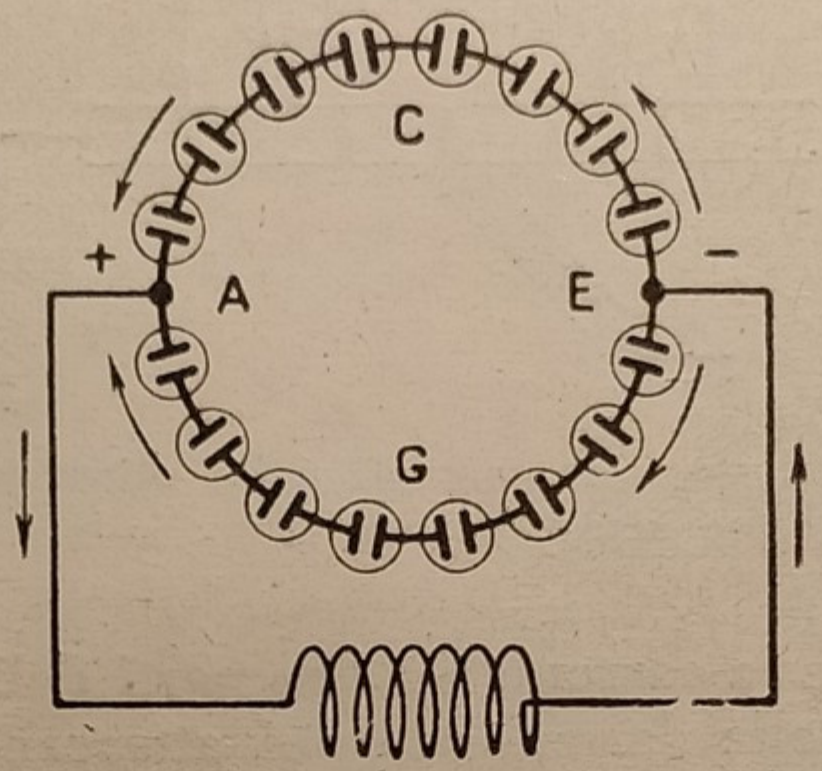


Fig. 230 - Schema di indotto con 16 spire.

127. Posizione delle spazzole sui collettori. — Abbiamo visto che la posizione delle spazzole deve corrispondere all'attacco alle lamelle delle spire che passano per l'asse o piano neutro nel campo magnetico, poichè in quella posizione nelle spire indotte si inverte la direzione della corrente.

Nella pratica si riscontra che il piano di appoggio delle spazzole, affinchè non si abbiano scintille al collettore, deve essere spostato e precisamente inclinato rispetto all'asse neutro nel senso della rotazione *in avanti* se la macchina funziona come dinamo; in *indietro* se essa funziona come motore.

La necessità di questo spostamento e della origine delle scintille è spiegabile da due cause:

1.° Dal modo come si compie la commutazione della corrente nelle spire passanti sotto alle spazzole.

2.° Dalla azione del campo magnetico indotto rispetto al campo induttore, (reazione d'armatura).

128. Commutazione della corrente ed origine delle scintille. — Si consideri nella fig. 231 la parte del collettore sulla quale si appoggia una spazzola e le spire indotte che si attaccano alle lamelle sotto la spazzola. Sappiamo che ad ogni

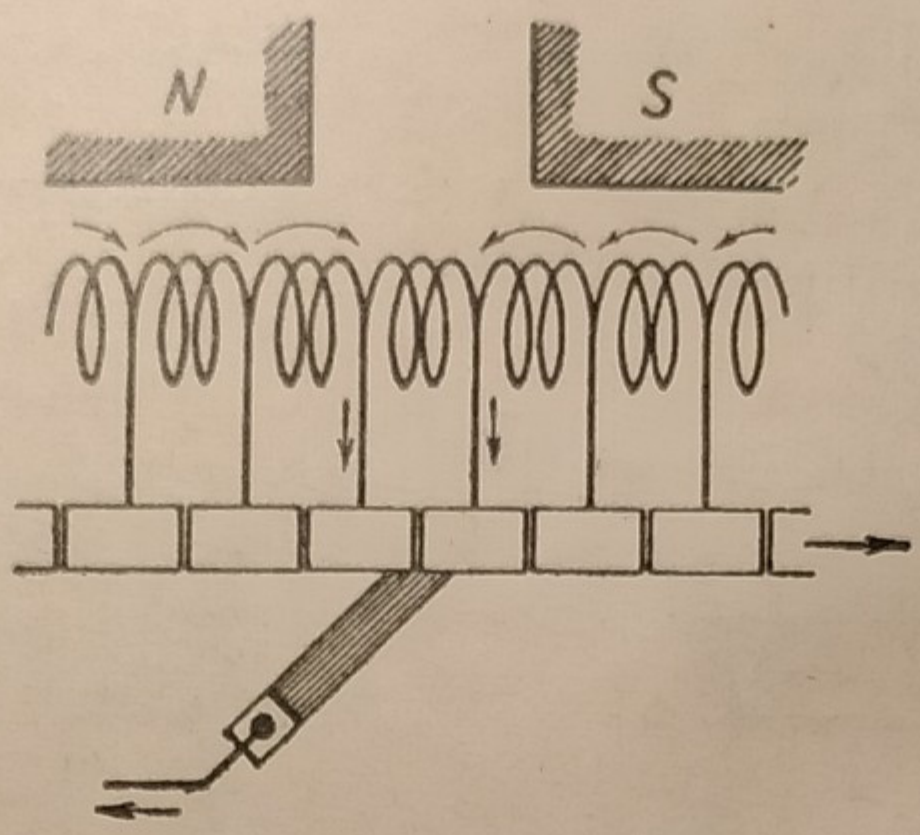


Fig. 231 - Direzione delle correnti nelle spire che passano per l'asse neutro o sotto le spazzole.

spazzola affluisce la corrente da due parti dell'avvolgimento e che ad ogni lamella del collettore si attaccano *due estremità* di due spire o matasse. Nella fig. 232 sono rappresentate le tre posizioni diverse che una spazzola viene ad assumere nel trascorrere sopra a due lamelle consecutive 1 e 2.

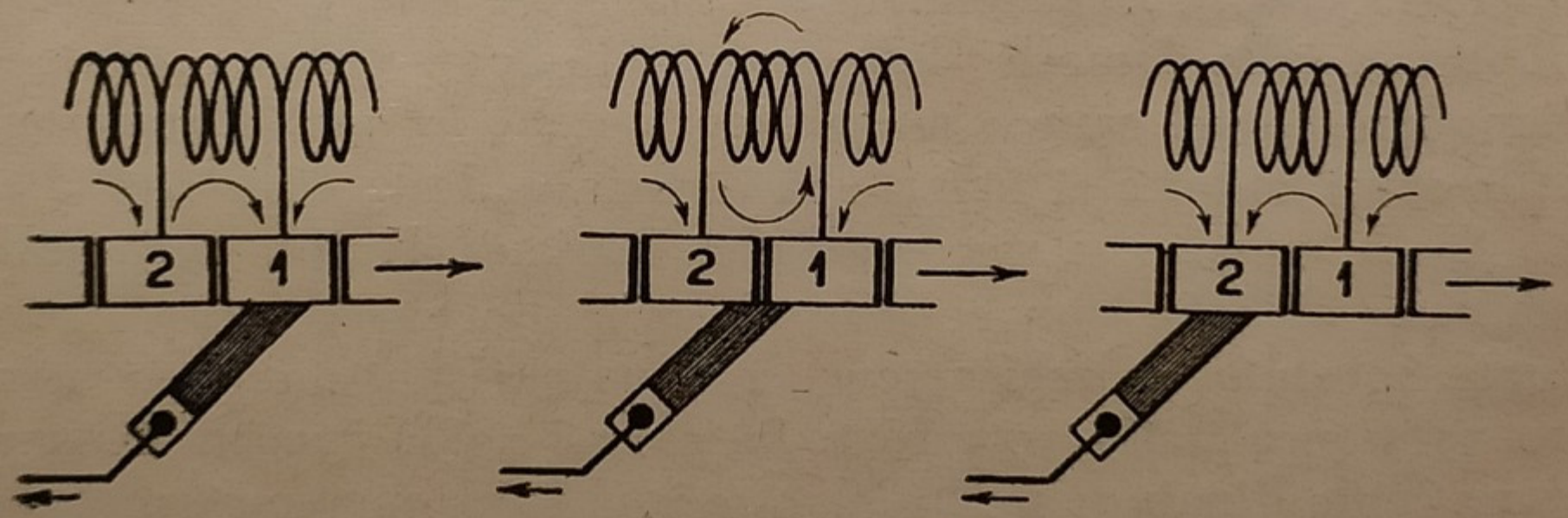


Fig. 232 . Commutazione della corrente nella spirale che passa sotto una spazzola

La spirale che si trova fra queste lamelle si dice *spirale commutata*, poichè nella prima posizione essa è percorsa da una corrente in un senso; nella seconda essa si trova in corto circuito; nella terza viene percorsa da una corrente in senso contrario. Tutto ciò si compie in un tempo estremamente breve, nell'ordine di qualche centesimo di secondo.

Ora ricordiamo che una spirale di avvolgimento avvolta su ferro rappresenta una resistenza induttiva e che la corrente

in essa, per il fenomeno della selfinduzione, non può annullarsi nè ristabilirsi in senso contrario istantaneamente poichè l'induttanza della spirale si oppone. Se quindi la corrente nella spirale commutata, passando dalla prima posizione alla posizione terza, non riesce a stabilirsi, succederà una scintilla sulla punta della spazzola dovuta all' extra corrente di rottura totale o parziale del circuito delle spire. La selfinduzione nella spira commutata equivale ad una repentina introduzione fra la spazzola e l'indotto di una resistenza induttiva e cioè ad una parziale rottura del circuito.

Ad ovviare questo inconveniente è necessario di portare la spira commutata al di là della zona neutra sotto ad un campo magnetico tale che, durante il brevissimo tempo di corto circuito, si abbia a formare una corrente indotta inversa a quella che vi era prima ed eguale a quella che si ha dopo.

Il campo magnetico che può attuare rapidamente l'inversione è quello del polo in *avanti* nel senso della rotazione, se la macchina funziona come generatrice e *indietro* se essa *funziona* da motore. Infatti quando una dinamo funziona da motore nell'avvolgimento dell'armatura circola una corrente in senso contrario di quella che aveva funzionando da dinamo.

Studiate così le cause del scintillìo delle spazzole si possono cavare delle regole generali per ovviare all'inconveniente.

1.° Occorre che la spira commutata si trovi in una zona del campo magnetico che sia favorevole alla commutazione; che vi si formi una intensità uguale a quella della corrente nell'indotto e infine che il campo sia graduabile con precisione. Si capisce che il fenomeno del scintillìo, della selfinduzione, è dipendente dall'intensità della corrente nell'indotto nell'istante della commutazione. Se questa corrente è zero, è nullo ogni fenomeno di commutazione; se è invece molto grande saranno pure grandi gli effetti di commutazione ed il pericolo del scintillìo.

Nelle vecchie dinamo il campo magnetico favorevole alla commutazione in avanti era generalmente troppo debole (per l'effetto della reazione di armatura che esaminiamo più avanti); talvolta anzi era contrario; da ciò il forte scintillìo.

2.° Occorre per ridurre la f. e. m. di selfinduzione nelle spirali commutate, di rendere minimo il numero di spire co-

stituenti le matasse, il che significa aumentare le lamelle del collettore.

Vedremo in appresso come col sistema dei poli ausiliari si sia risolto il problema relativo alla commutazione.

129. Reazione d'armatura. — Consideriamo la sezione dell'armatura di una dinamo a tamburo. (Fig. 233).

Se la dinamo svolge corrente, avremo che tutti i fili che si trovano sotto al polo N sono percorsi da una corrente in un senso; quelli che si trovano sotto al polo S saranno percorsi da una corrente in senso contrario. Perciò l'armatura viene a costituire un elettromagnete il cui flusso magnetico è formato da tante linee di forza uscenti dall'armatura e che si chiudono ad arco attraverso le espansioni polari come è chiaramente indicato dalla fig. 233a.

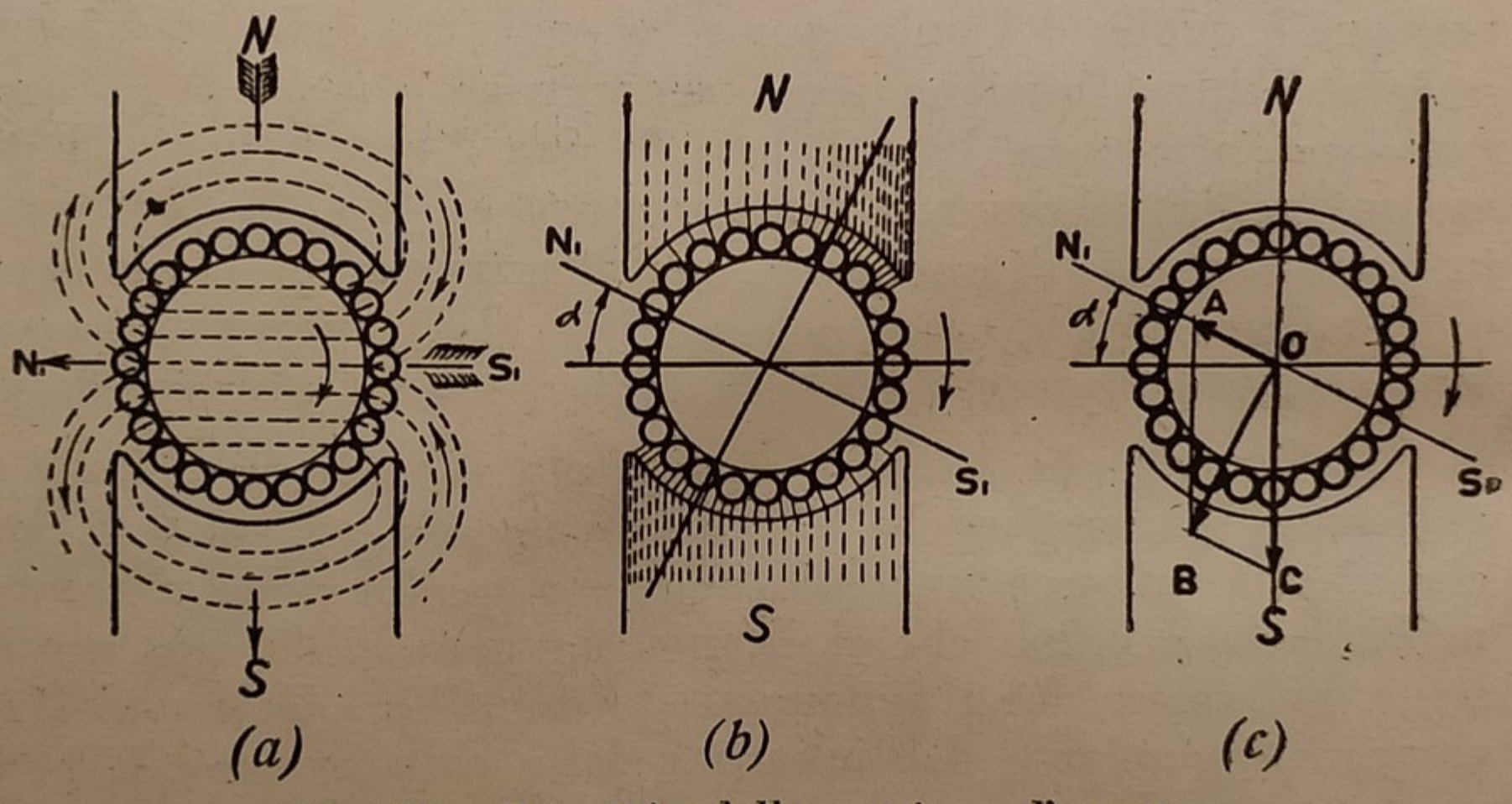


Fig. 233 - Principio della reazione d'armatura.

I due flussi, induttore e indotto, non potendo coesistere separatamente si compongono dando luogo ad un unico flusso obliquo (come è indicato dalla fig. 233b) e quindi si avrà una condensazione di linee di forza sopra un fianco della espansione polare e ad una rarefazione sul fianco opposto. Nell'interferro la densità del campo invece di essere uniforme andrà crescendo da una punta polare alla punta opposta.

Pei motori, essendo la corrente nell'armatura in senso

contrario, l'effetto del campo indotto sarà pure rovescio e l'inclinazione in senso opposto.

Questo fatto si dice *reazione d'armatura.*

L'inclinazione del flusso magnetico e la sua dissimetria porta di conseguenza ad una inclinazione dell'asse neutro secondo una direzione N^1 S^1 e quindi ad uno spostamento delle spazzole sul collettore per raggiungere il nuovo piano di commutazione.

Il fenomeno della reazione d'armatura si può trattare considerando i flussi magnetici come forze. Sia OB l'asse inclinato del flusso effettivo esistente nell'armatura. (Fig. 233 *c*).

Il flusso OB si può scomporre in due: l'uno OA diretto secondo l'asse neutro, e che rappresenta in lunghezza e direzione l'intensità e la direzione del flusso indotto; l'altro OC diretto secondo l'asse geometrico dei poli e che rappresenta il flusso induttore. L'angolo α segna l'angolo di spostamento delle spazzole.

Da questa costruzione grafica si deduce che OC è maggiore di OB, cioè l'effetto del campo indotto è quello di diminuire l'azione del campo induttore.

Consideriamo ancora la sezione di un indotto di dinamo rappresentata dalla fig. 234.

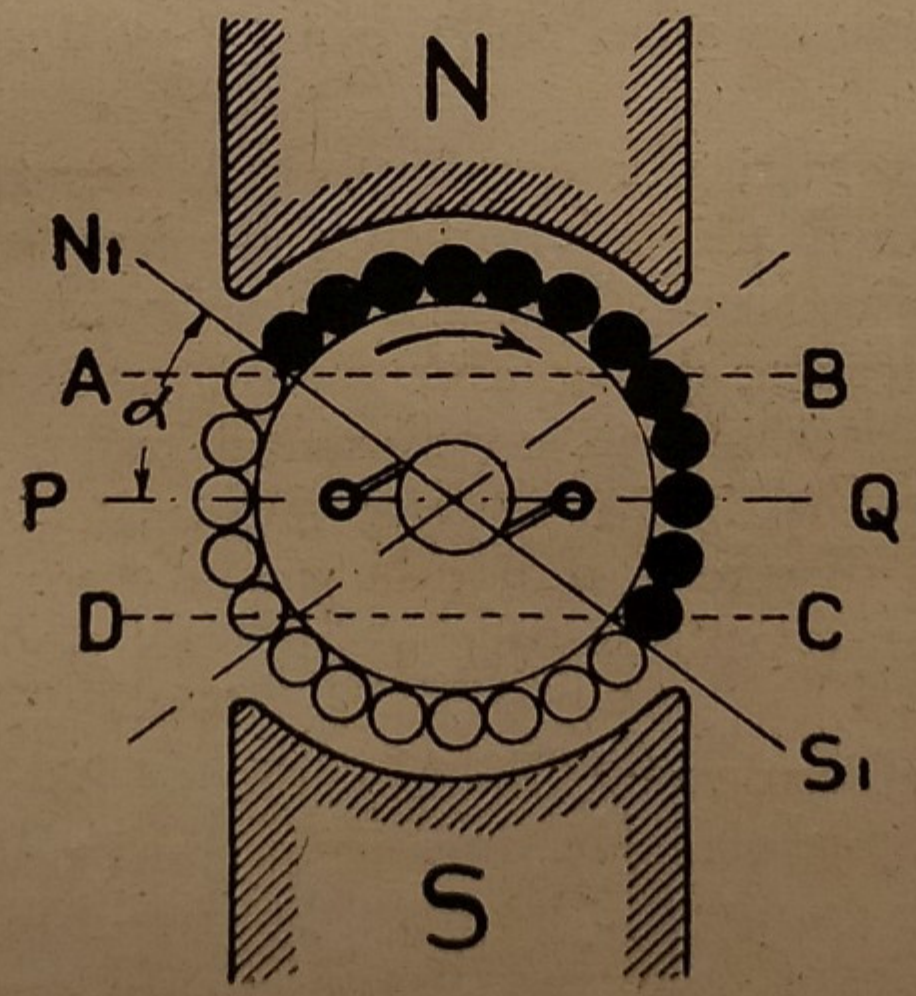


Fig. 234 - Le correnti nell'indotto di una dinamo bipolare danno luogo a un campo torcente e ad un campo smagnetizzante.

Dai punti A e C di intersezione dell'asse neutro inclinato conduciamo due parallele AB e DC all'asse geometrico PQ. I conduttori che coprono la superficie dell'indotto si possono dividere in due categorie: 1.° quelli sopra AB e sotto CD; 2.° quelli compresi nel settore ABCD. I primi hanno per effetto un campo perpendicolare al flusso principale cioè un vero *campo torcente*, i secondi dando luogo ad un *flusso smagnetizzante* essendo in senso esattamente contrario al flusso magnetico induttore. Sono questi ultimi che danno luogo quindi ad un abbassamento della tensione.

Gli effetti quindi della reazione d'armatura nelle dinamo sono due:

1.° storcimento del campo e inclinazione dell'asse neutro e quindi del piano di commutazione delle spazzole;

2.° indebolimento del campo induttore e quindi abbassamento della tensione.

130. Dinamo con poli ausiliari ed avvolgimenti di compensazione. — Gli effetti della reazione d'armatura sono proporzionali alla intensità della corrente prodotta dall'armatura; ed infatti quando il carico in ampère è zero gli effetti della reazione sono nulli, quindi nullo lo spostamento delle spazzole,

I mezzi suggeriti per combattere la reazione d'armatura sono diversi, ma il più adoperato è quello dei *poli ausiliari o poli di compensazione*. I poli ausiliari sono dei piccoli poli attaccati alla carcassa del campo magnetico induttore, eccitati da un circuito in serie coll'armatura ed innestati nello spazio fra i poli induttori principali, nel modo indicato dalla fig. 235.

La polarità di questi poli è la stessa di quella del campo trasversale creato dall'indotto: *quindi ha un'azione opposta e neutralizzante*.

Ora noi abbiam visto che la polarità del campo dell'indotto nell'interspazio fra le due espansioni polari è uguale a quella del polo in avanti quando la macchina funziona da dinamo ed è contraria se essa funziona da motore.

I poli ausiliari dovendo creare un flusso magnetico opposto od antagonista saranno di polarità uguale al polo in

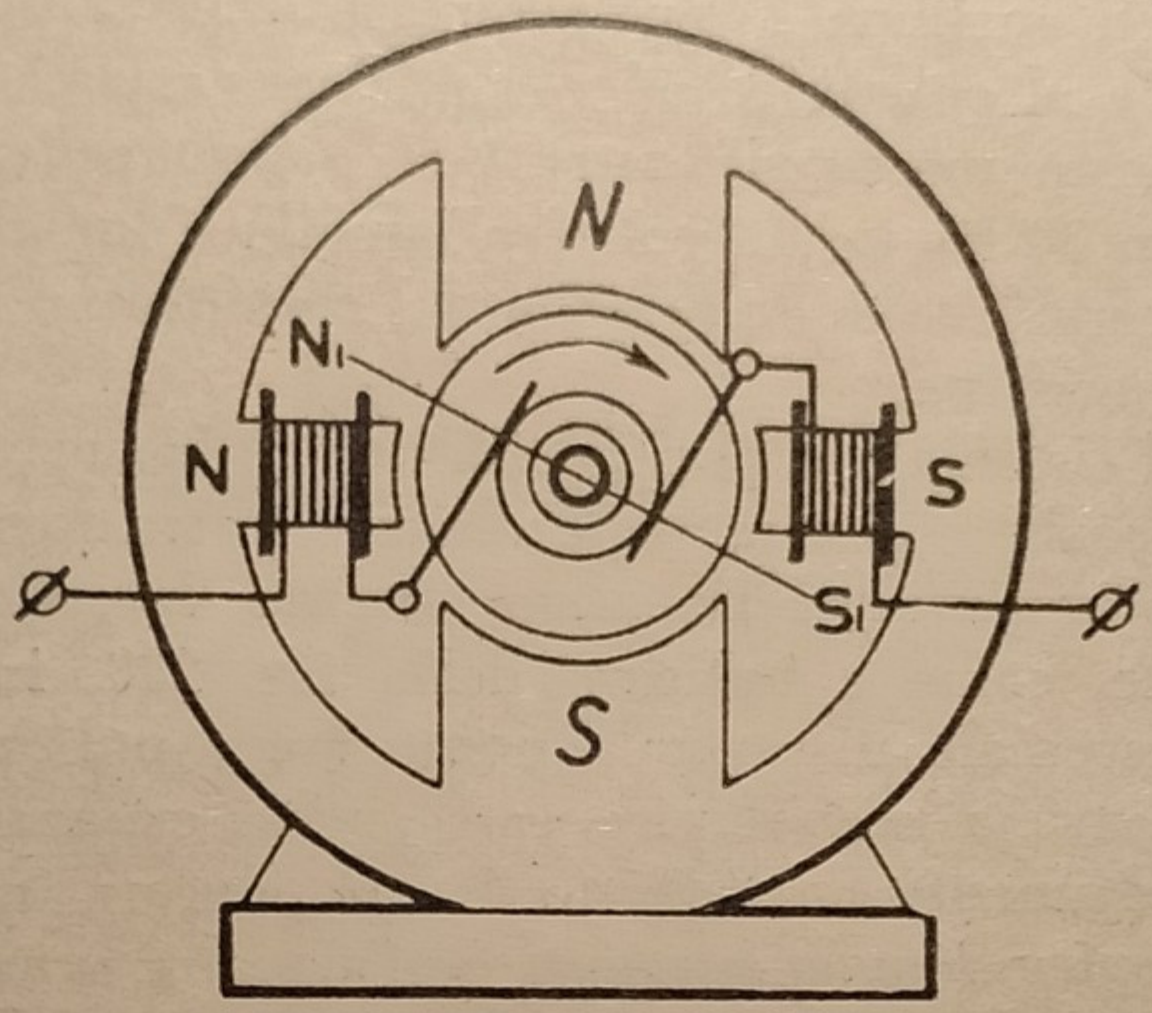
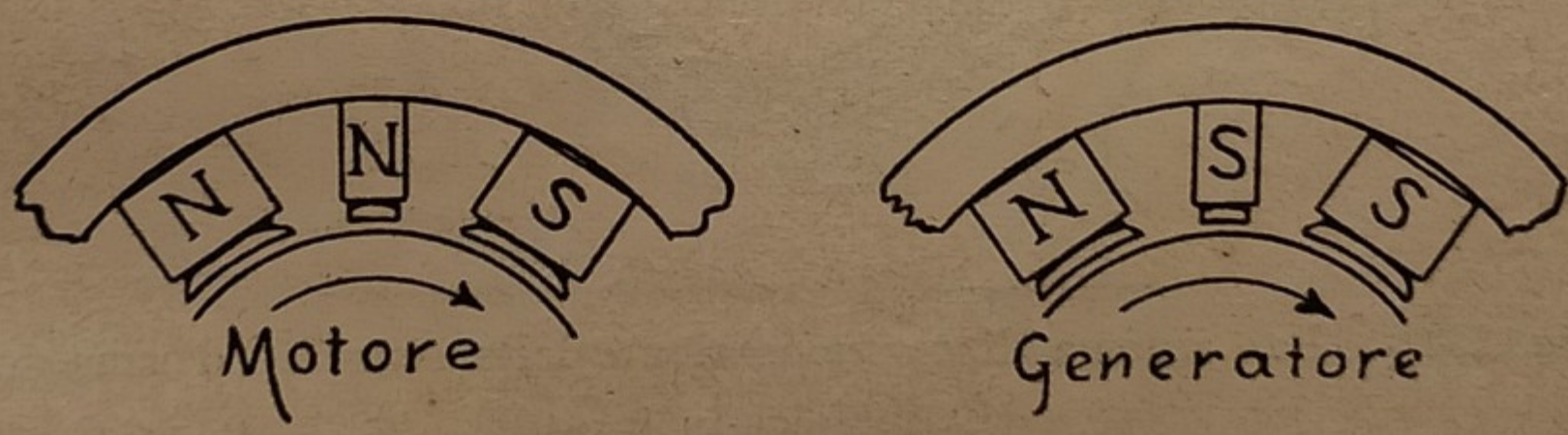


Fig. 235 - Poli ausiliari o di compensazione delle dinamo per compensare la reazione d'armatura e togliere lo scintillìo.

avanti del sistema induttore se la macchina funziona come dinamo e di polarità contraria se è un motore. (Figg. 236-237).

I poli ausiliari oltre a compensare la reazione di armatura e immobilizzare le spazzole, hanno il vantaggio di fornire un campo favorevole alla commutazione delle spire. Esso è appunto un campo uguale alla punta polare in avanti ed è



Figg. 236 - 237 - Polarità dei poli ausiliari.

variabile in proporzione degli ampères d'armatura perchè i poli ausiliari sono eccitati in serie coll'armatura. Se la corrente nell'armatura si inverte, passando la macchina dallo stato di dinamo a quello di motore i poli ausiliari si invertono pure di polarità neutralizzando il campo indotto onde i poli ausiliari per macchina funzionante da dinamo agiscono anche se la macchina passa allo stato di motore. Regolando gli ampères

spire dei poli ausiliari si può ottenere l'abolizione completa delle scintille al collettore ed a qualsiasi carico.

Con questo mezzo, i costruttori hanno potuto fare dei collettori con 30 fino a 40 volt fra lamella e lamella e quindi diminuire il numero delle lamelle del collettore e rendere più leggera la macchina.

Oltre al sistema dei poli ausiliari, per la correzione degli effetti di reazione d'armatura alcuni costruttori applicano alle dinamo importanti un altro sistema di compensazione. Esso consiste, come è indicato dalla fig. 238, in un avvolgimento trasversale disposto a ponte fra i poli principali e passante dentro a scanalature fatte nelle espansioni polari. Questo avvolgimento ha l'effetto di compensare in gran parte le *ampères spire demagnetizzanti* dell'armatura, mentre i poli ausiliari hanno l'effetto di compensare le ampères spire *torcenti* dell'armatura e sopratutto di favorire la commutazione della corrente nelle spire passanti per l'asse neutro.

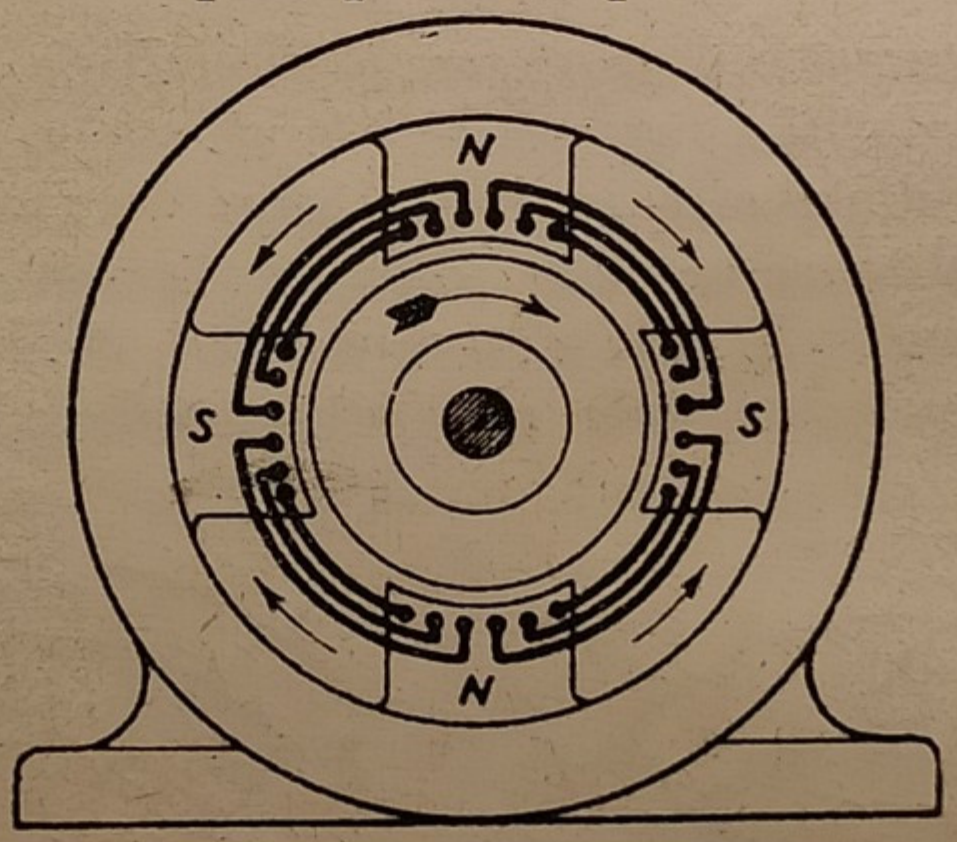


Fig. 238 - Altro sistema di compensazione della reazione d'armatura.

Le macchine con poli ausiliari hanno attualmente una larga diffusione specialmente per dinamo e motori a grande velocità (turbodinamo) per le macchine con forti e brusche variazioni di carico, per motori da locomotive e da tram, per dinamo alle quali si richiedono tensioni e intensità molto variabili.

131. Forza elettromotrice delle dinamo. — Abbiam visto che nei fenomeni di induzione, la f. e. m. *e* indotta in

un filo lungo l *cm.*, che taglia od è tagliato da un flusso di intensità B, con velocità v cm. al minuto secondo, è data in ogni istante:

$$e = v \times l \times B \times 10^{-8} \qquad (1)$$

Richiamiamoci alle figg. 220 e 221 che rappresentano la sezione di una dinamo bipolare e si chiami:

b = lo sviluppo dell'arco polare in cm;
D = il diametro dell'armatura in cm.;
n = il numero dei giri al minuto primo;
N = il numero totale dei conduttori alla superficie esterna dell'indotto;
E = la f. e. m. sviluppata;
Φ = il flusso di linee di forza che promana da ciascun polo.

Avremo la seguente relazione:

$$v = \frac{\pi \, D \, n}{60}$$

La f. e. m. totale E sarà data dalla f. e. m. e di ciascun filo per il numero dei fili attivi che si trovano sotto uno degli archi polari e cioè da un numero di conduttori pari a:

$$N \frac{b}{\pi \, D}$$

Sostituendo questi valori nella formola (1):

$$E = \frac{\pi \, D \, n}{60} \times l \times N \frac{b}{\pi \, D} \times B \, 10^{-8}$$

Ma:

$$b \times B \times l = \Phi$$

Sostituendo e semplificando si ottiene infine:

$$E = \frac{n \times N \times \Phi \times 10^{-8}}{60} \qquad (2)$$

formula che serve a calcolare la forza elettromotrice sviluppata da una dinamo bipolare.

Se la *dinamo è multipolare con p* paia di poli e se i fili d'armatura sono connessi in serie in modo che la macchina può funzionare con un sol paio di spazzole (avvolgimenti ondulati) allora si ha:

$$E = \frac{n \times N \times \Phi \times p}{60} 10^{-8} \qquad (3)$$

Ma talvolta le dinamo multipolari hanno un avvolgimento di fili o sbarre in modo da formare tanti circuiti in *parallelo* oppure anche in *serie parallele.*

Nel primo caso ogni paio di poli contigui funziona come una dinamo bipolare; ad ogni polo corrisponde un gruppo di spazzole; le spazzole + e le spazzole — sono connesse fra loro in parallelo. La intensità totale è la somma delle intensità di ciascuna date da ciascun paio di poli. Serve la formola (2).

Nel secondo caso se indichiamo con $2p_1$ il numero delle serie parallele si avrà:

$$E = \frac{N \times \Phi \times n \times p}{60 \times p_1} 10^{-8} \qquad (4)$$

Se, ad esempio, l'avvolgimento è fatto col sistema imbricato o in parallelo semplice (sistema assai usato per le dinamo a bassa tensione) siccome a ciascun polo corrisponde una serie di avvolgimento in parallelo fra le spazzole, allora si ha $p_1 = p$ e la formula si riduce alla (2).

Le formole valgono tanto per gli avvolgimenti a tamburro che ad anello. La tensione E risultante è quella *interna;* per avere quella esterna ai morsetti bisogna sottrarre la perdita dovuta alla resistenza ohmica dei conduttori di avvolgimento.

Dalle stesse formole si possono ricavare: pei motori la velocità, per le dinamo di cui si conosca E e si può ricavare il valore del flusso Φ o l'induzione B o il numero dei conduttori N.

La tensione V ai morsetti di una dinamo è minore della f. e. m. E poichè una parte viene assorbita dalla resistenza r di indotto. Onde se I è l'intensità:

$$V = E - rI$$

Per dinamo con avvolgimento in serie o imbricato (in due derivazioni):

$$r = 0.02 \frac{L}{4\ q}$$

dove L = lunghezza totale in *m* del filo avvolto e *q* = sezione in mmq.

Se la dinamo è ad eccitazione in serie essendo r_m la resistenza del circuito del campo e r_r quella del filo d'indotto:

$$r = r_r + r_m$$

ESEMPIO. — Un indotto di dinamo bipolare ha 400 fili alla superficie (200 spire). Le espansioni polari sono di 20 × 15 cm.; la induzione B = 6000; la velocità 1200 giri al 1'. Il filo avvolto è lungo in totale 150 m. ed è della sezione di 5 mmq. La intensità da sviluppare è di 20 Amp. Si domanda la f. e. m. sviluppata e la tensione ai morsetti.

R. — Applicando la formola generale:

$$E = \frac{1200 \times 400 \times [20 \times 15 \times 6000] \times 10^{-8}}{60}$$

$$E = 144 \text{ volt}$$

La resistenza dell'avvolgimento bipolare è:

$$r = 0.02 \frac{150}{4 \times 5} = 0.15$$

La tensione ai morsetti sarà:

$$144 - 0{,}15 \times 20 = 141 \text{ volt.}$$

Trasformazione degli avvolgimenti. — Capita talvolta di dover trasformare una dinamo da una tensione in un'altra, cambiando gli avvolgimenti dell'indotto e dell'induttore in modo però da mantenere costante il flusso magnetico ed il numero dei giri. Le regole da seguire sono le seguenti:

1.° Il numero dei fili d'avvolgimento dell'indotto deve essere proporzionale alla tensione che si vuol ottenere. Onde se N ed E era il numero dei conduttori alla superficie dell'indotto e la tensione in volt della macchina primitiva; se N_1 e E_1 sono i valori per la nuova macchina si ha:

$$\frac{E}{E_1} = \frac{N}{N_1} \quad \text{da cui} \quad N_1 = \frac{E_1\ N}{E}$$

2.° Calcolato così il numero dei conduttori si esamina sulla scorta del disegno dell'avvolgimento e delle relative formole se si può utilizzare il collettore od è necessario di cambiarlo. Per utilizzare lo stesso collettore bisogna fare un numero di matasse come prima.

3.° Si calcola l'intensità della corrente della nuova dinamo in modo che i watt siano uguali a quelli della macchina primitiva e si assegna al filo d'avvolgimento una sezione proporzionale a quella del filo primitivo. Generalmente la densità della corrente nei fili si tiene da 2,5 a 4 amp. per mmq.

4.° L'avvolgimento dell'induttore deve essere tale da mantenersi invariato il numero delle amp-spire. Il numero delle spire sui poli induttori varia in ragione diretta della tensione se l'eccitazione è in derivazione e la sezione del filo in ragione inversa.

5.° Se l'avvolgimento è fatto in scanalature bisogna esaminare se i fili od i lati di matassa riempiono bene lo spazio dei canali.

6.° Si deve esaminare se la suddivisione dei fili, il numero delle matasse e dei fili per sezione soddisfano alle formole del paragrafo 136.

132. Indotti delle dinamo. — Il nucleo degli indotti è formato da un pacco di lamierini di ferro dolcissimo (esente di carbonio) tagliati a dischi con delle trancie; l'isolamento fra i dischi è fatto con carta dello spessore di 0,04 a 0,06 mm. Lo spessore dei lamierini è di 0,3 a 0,5. L'*incartamento* o copertura di carta si fa sui fogli intieri delle lamiere (mt. 1×2) prima della tranciatura. I pacchi dei dischi vengono pressati, imbullonati e infilati sopra l'albero della dinamo o su bussole a raggere di ghisa fissate sull'albero. (Fig. 239).

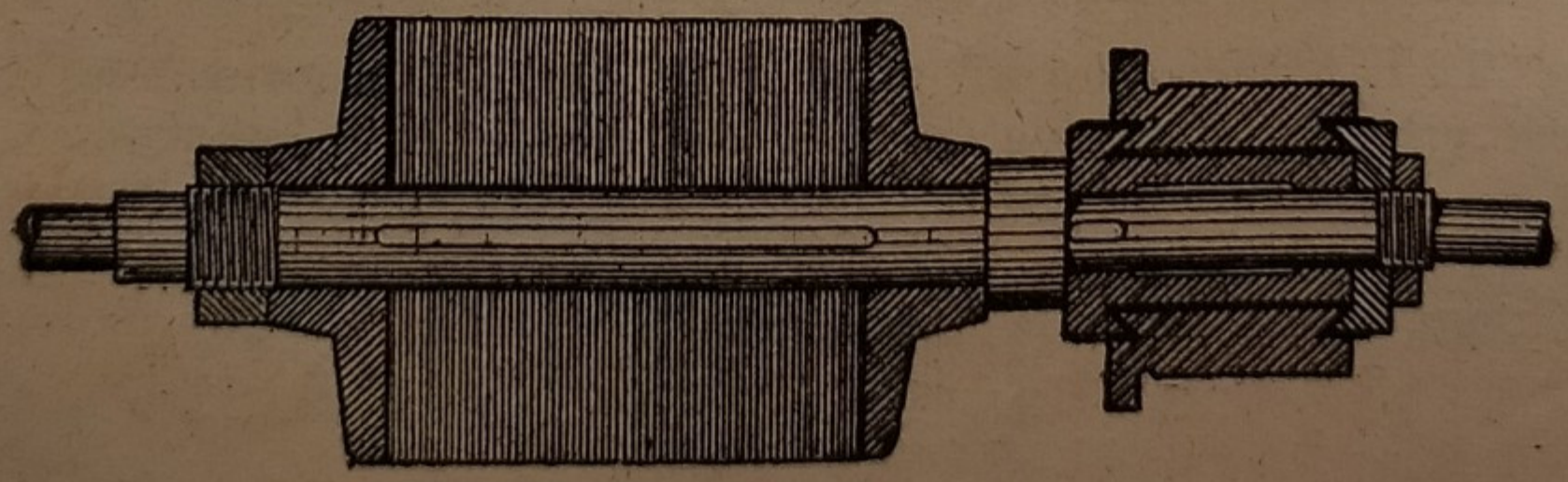


Fig. 239 . Sezione di un indotto di dinamo.

Gli indotti delle dinamo possono avere la superficie esterna dei nuclei lamellari *liscia;* ma nelle moderne dinamo i nuclei sono quasi sempre *scanalati* o *dentati.* Le scanalature sono ora rettangolari, ora a fori chiusi od aperti. (Fig. 240).

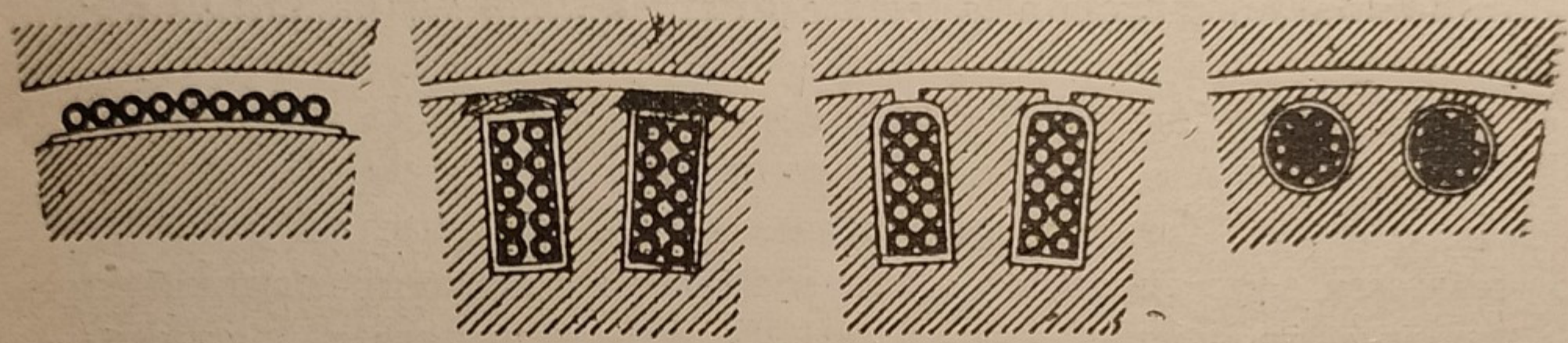


Fig. 240 - Forme diverse di scanalature negli indotti.

Gli indotti lisci costano meno, ma dànno luogo a interferri molto grandi; essendo perciò grande la riluttanza del circuito magnetico, richiedono campi magnetici induttori molto più grandi e quindi forti correnti d'eccitazione. Cogli indotti scanalati invece l'interferro resta molto ridotto e precisamente da 1 a 2 mm. per le macchine di media potenza; da 5 a 8 per le grosse macchine. I fili nelle scanalature dei nuclei restano molto più protetti.

Nel mentre le forze magnetiche che si sviluppano tra indotto e campo induttore, negli indotti lisci, si attaccano direttamente ai fili d'avvolgimento, negli indotti dentati le forze si attaccano al ferro ed i fili non sono più sollecitati a spostarsi. Però i fili collocati nelle scanalature, e specialmente se queste sono chiuse, offrono effetti maggiori di selfinduzione e cioè sono un ostacolo maggiore alla commutazione. Nelle dinamo moderne si sono abbandonati quasi completamente gli indotti lisci e quelli a fori chiusi. Si da la preferenza alle scanalature aperte di forma rettangolare poichè con esse si può preparare a parte le matasse invece di avvolgere i fili direttamente sull'indotto.

Nei paragrafi che seguono tratteremo esclusivamente degli indotti a cilindro o tamburo, tralasciando gli indotti ad anello ormai completamente abbandonati. Infatti gli indotti ad anello hanno i seguenti svantaggi: 1.° la parte di avvolgimento verso l'interno dell'anello non serve al fenomeno dell'induzione e rappresenta una resistenza inutile; 2.° il peso

del nucleo e quindi della macchina riesce maggiore; 3.° il circuito magnetico dell'indotto è più lungo e la reazione dell'indotto maggiore. Solo vantaggio degli indotti ad anello è di non avere vicine fra loro spire a grande differenza di potenziale mentre nelle dinamo a tamburo è inevitabile di avere sovrapposizioni ed incroci alle testate di fili a forte differenza di potenziale.

L'avvolgimento degli indotti è formato ora da *sbarrette* di rame a sezione quadrata o rettangolare, ora da fili avvolti in modo da formare tante matasse: le sbarrette ed i lati di matassa sono incastrati nelle scanalature. In ogni scanalatura vi possono essere 2 - 4 - 6 lati di matasse separate. I conduttori vengono isolati dal nucleo di ferro con forti spessori di cartone pressato in modo che in nessun punto l'avvolgimento possa toccare il ferro. Come fili d'avvolgimento si adoperano fili di rame con due coperture a spirale di filo di lino, canape, cotone verniciato. Talvolta si adoperano fili con copertura tessile a treccia od a calzetta.

La velocità periferica degli indotti non può superare 25-30 metri al minuto secondo, perchè la forza centrifuga potrebbe compromettere la stabilità dei fili.

133. Principio degli avvolgimenti a tamburo. — (1). *Tutti i fili dell'indotto che si trovano sotto ad un polo N sono sede di f. e. m. dirette in un senso; quelle sotto al polo S sono dirette in senso contrario.* Scopo nostro è di mostrare il modo con cui i conduttori si possono accoppiare in serie per sommare la f. e. m. nel giusto senso e fare gli attacchi alle lamelle del collettore.

Per sommare la f. e. m. occorre collegare ciascun filo sotto al polo N con uno sotto al polo S in modo da costituire una spira. Più spire direttamente in serie formano una *sezione o matassa; ogni sezione ha un lato sotto ad un polo N ed un lato sotto ad un polo S* (Fig. 241).

---

(1) Per quanto riguarda gli avvolgimenti delle macchine elettriche abbiamo seguito le traccie del libro Ing. G. Rebora — « Costruzione delle macchine elettriche » — che raccomandiamo vivamente agli elettricisti che, vogliono approfondirsi nella costruzione di dette macchine.

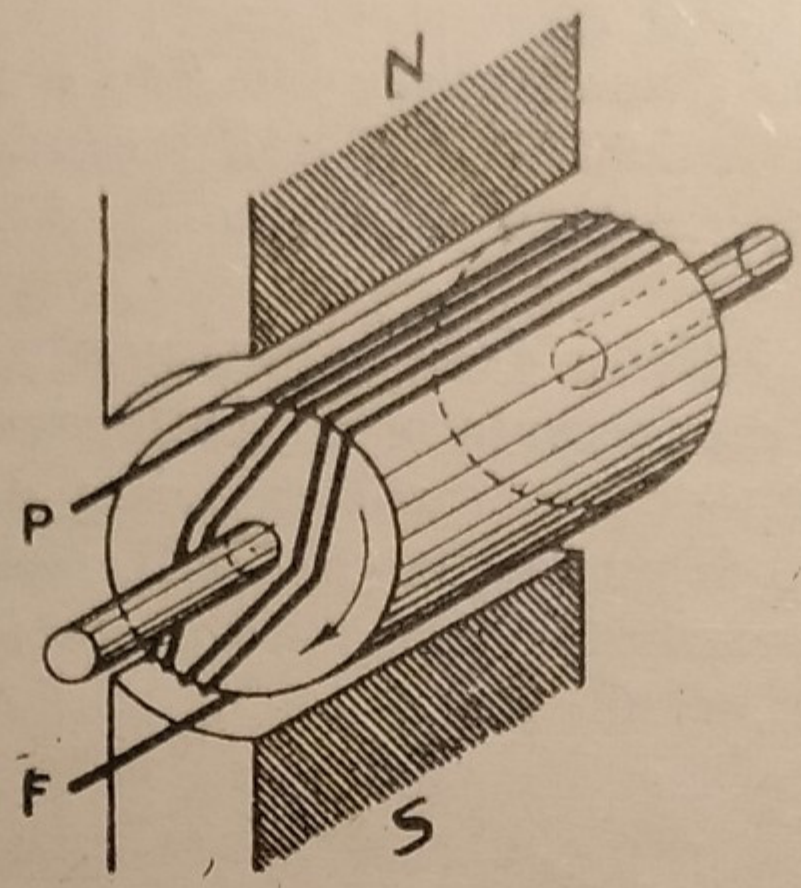


Fig. 241 - Come è disposta una delle spire d'avvolgimento in un indotto a tamburo.

Ogni matassa o sezione avendo due estremità queste si attaccano a due lamelle del collettore; ogni lamella di collettore porta sempre due attacchi per due sezioni. Ogni matassa avendo due lati, il numero dei lati di matassa dell'intero avvolgimento sarà pari. Il collegamento al collettore e perciò delle matasse fra loro si fa sempre sul lato anteriore (dalla parte cioè del collettore).

Il collegamento delle matasse si fa in due modi:

1.° *Sistema ondulato od in serie.* (Fig. 242).
2. *Sistema imbricato od in parallelo* (Fig. 243).

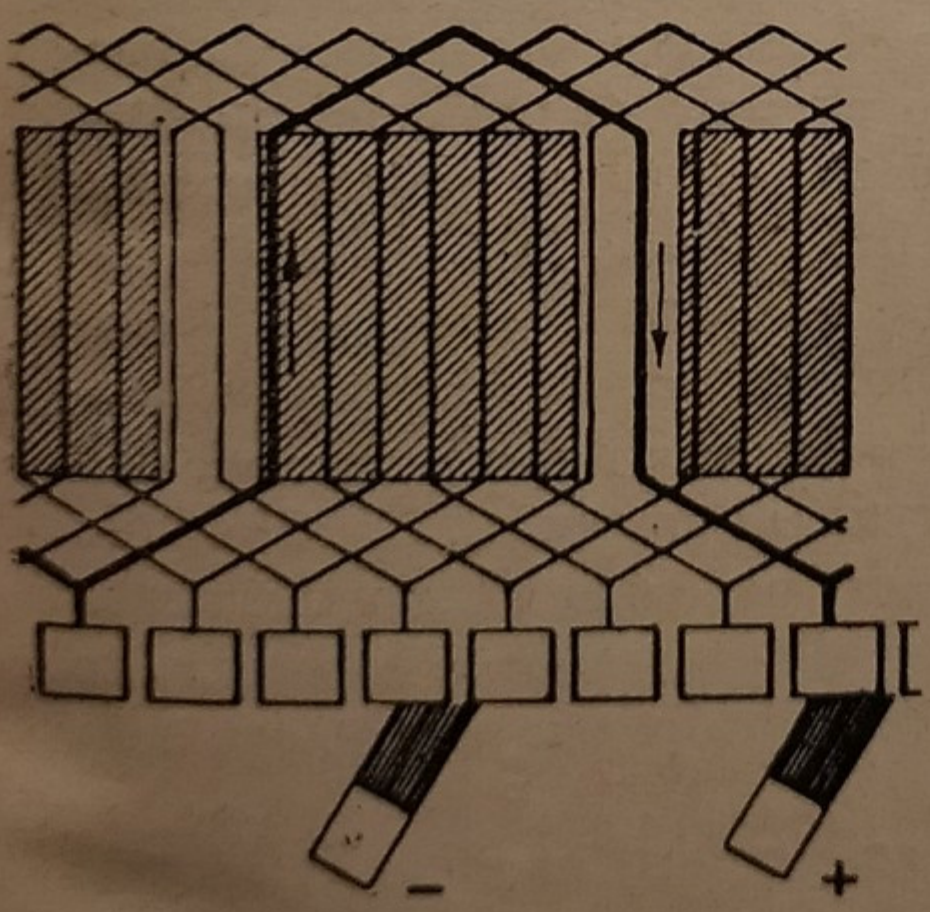


Fig. 242 - Avvolgimento ondulato.

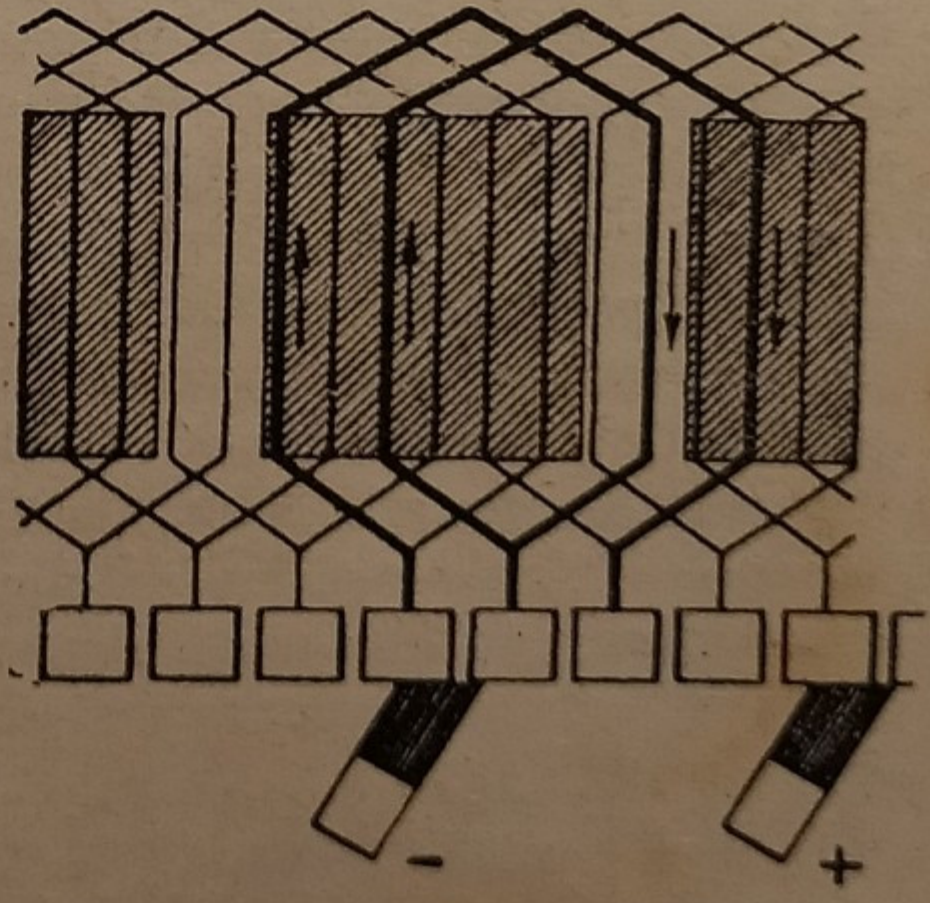


Fig. 243 - Avvolgimento imbricato.

Vi sono anche sistemi misti con due o più avvolgimenti ondulati messi in serie fra loro, ma essendo raramente impiegati, di essi daremo solo un cenno.

134. Caratteristiche dell'avvolgimento ondulato. — Nella fig. 244 è rappresentato un collegamento di matasse col sistema ondulato od in serie supposto di svolgere in un piano la superficie di un indotto a 4 poli. Nella fig. 245 è rappresentato il collegamento visto dalla parte del collettore.

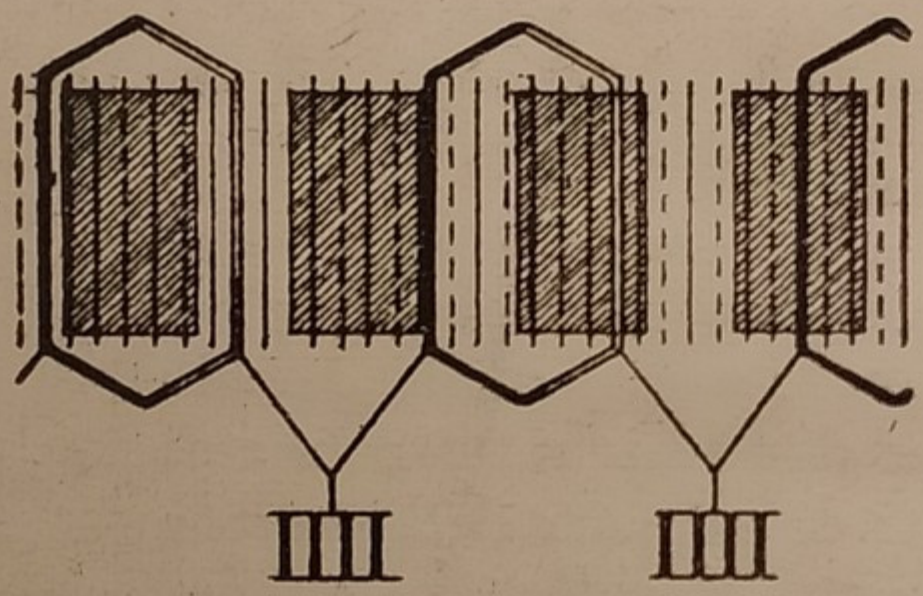


Fig. 244 - Matasse collegate col sistema ondulato

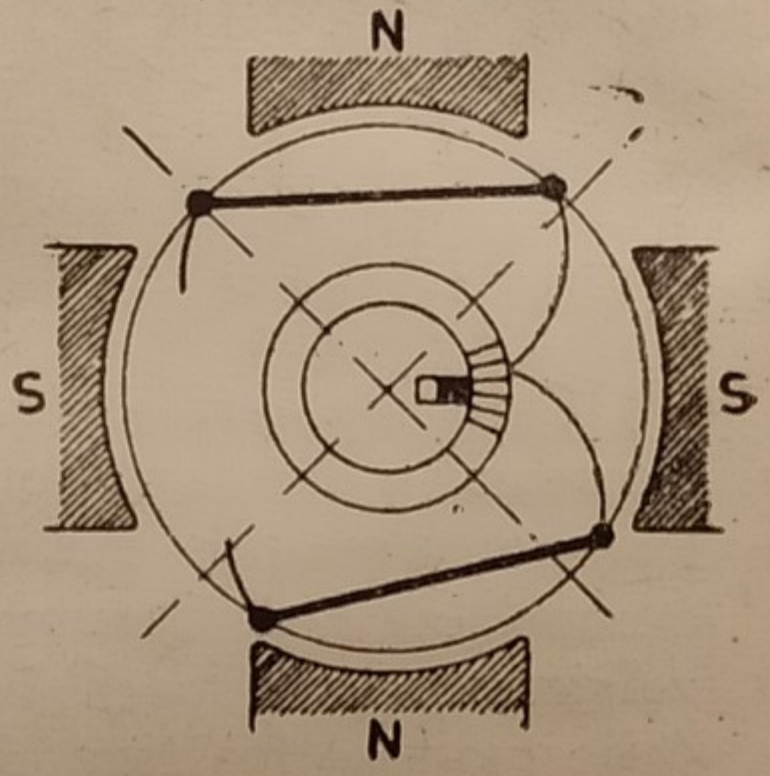


Fig. 245 - Come si dispongono i collegamenti delle matasse col sistema ondulato.

Nel sistema ondulato, se si parte da una lamella e si segue l'avvolgimento in una direzione si osserva che prima la corrente percorre una matassa sotto un paio di poli, poi un'altra matassa in posizione quasi simmetrica sotto al paio successivo ecc. ed arriva ad una lamella prima o dopo la lamella di partenza. Da questa lamella contigua a quella di partenza la corrente prosegue nel verso di prima seguendo le matasse contigue alle prime e così via finchè si arriva dopo una metà dell'avvolgimento alla spazzola di nome opposto. Continuando ancora si arriva alla lamella di partenza. L'avvolgimento resta diviso in due metà rispetto alle spazzole, e la corrrente entrando da una spazzola si suddivide in due metà seguendo vie opposte.

Perciò negli indotti con avvolgimento in serie la sezione del filo deve essere calcolata in base alla metà della corrente

assegnata alla dinamo. Cioè se la dinamo deve dare 100 Amp. il filo di avvolgimento deve sopportare 50 Amp.

Gli avvolgimenti ondulati richiedono quindi due sole spazzole qualunque sia il numero dei poli. Praticamente invece si mettono tante spazzole quanti sono i poli; ma in tal caso benchè le spazzole siano lontane fra loro e disposte in corrispondenza degli assi neutri, se si segue l'avvolgimento si vede che le spazzole dello stesso segno sono elettricamente vicine e separate appena da una matassa in posizione neutra.

Mettendo più spazzole si ottiene di raccorciare il collettore perchè la corrente resta suddivisa, mentre mettendo una coppia sola di spazzole, ognuna deve essere tanto estesa di superficie da sopportare tutta la corrente della dinamo.

135. Caratteristiche dell'avvolgimento parallelo. — Riferendoci alle figg. 246 - 247 che rappresentano in due modi un avvolgimento imbricato, si osserva che esso rimane diviso in tante parti dalle spazzole quanti sono i poli.

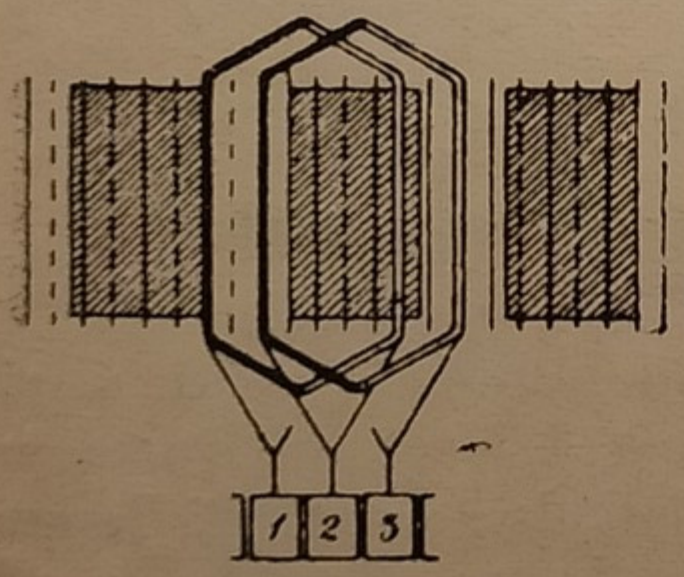


Fig. 246. - Matasse collegate col sistema imbricato.

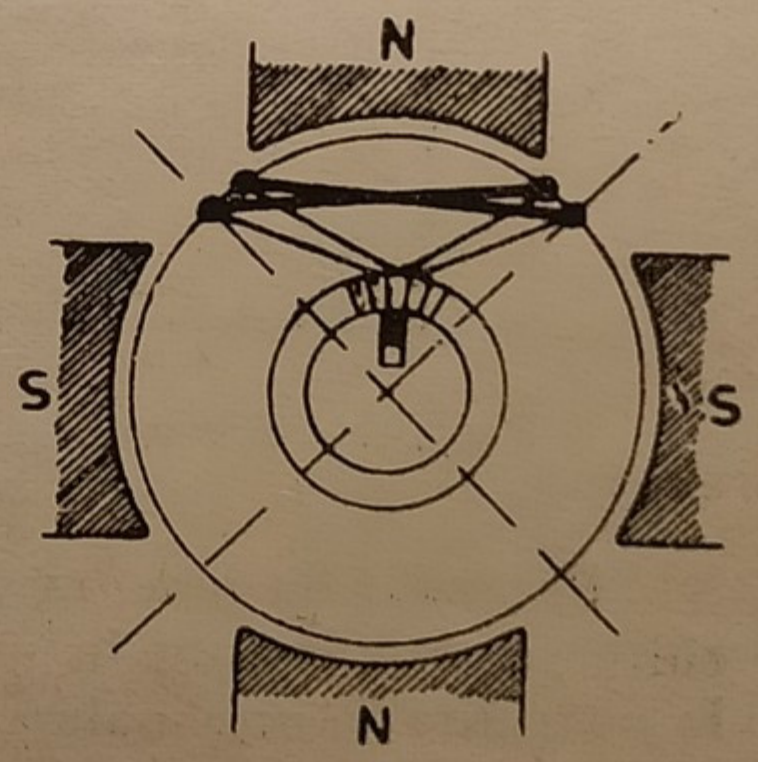


Fig. 247. - Vista di fronte di un indotto con matasse imbricate.

Il numero delle spazzole è uguale al numero dei poli; le spazzole si susseguono con polarità alternativamente di segno opposto; tutte le spazzole — sono unite insieme e tutte le spazzole + lo stesso.

In tal modo la corrente della dinamo si suddivide in tanti rami in parallelo quanti sono i poli; cioè ogni filo di avvolgi-

mento viene percorso con una intensità I/p, essendo I l'intensità totale e p il numero dei poli. Schematicamente il circuito, per una dinamo a 4 poli, dell'avvolgimento si riduce a quello della figura 248.

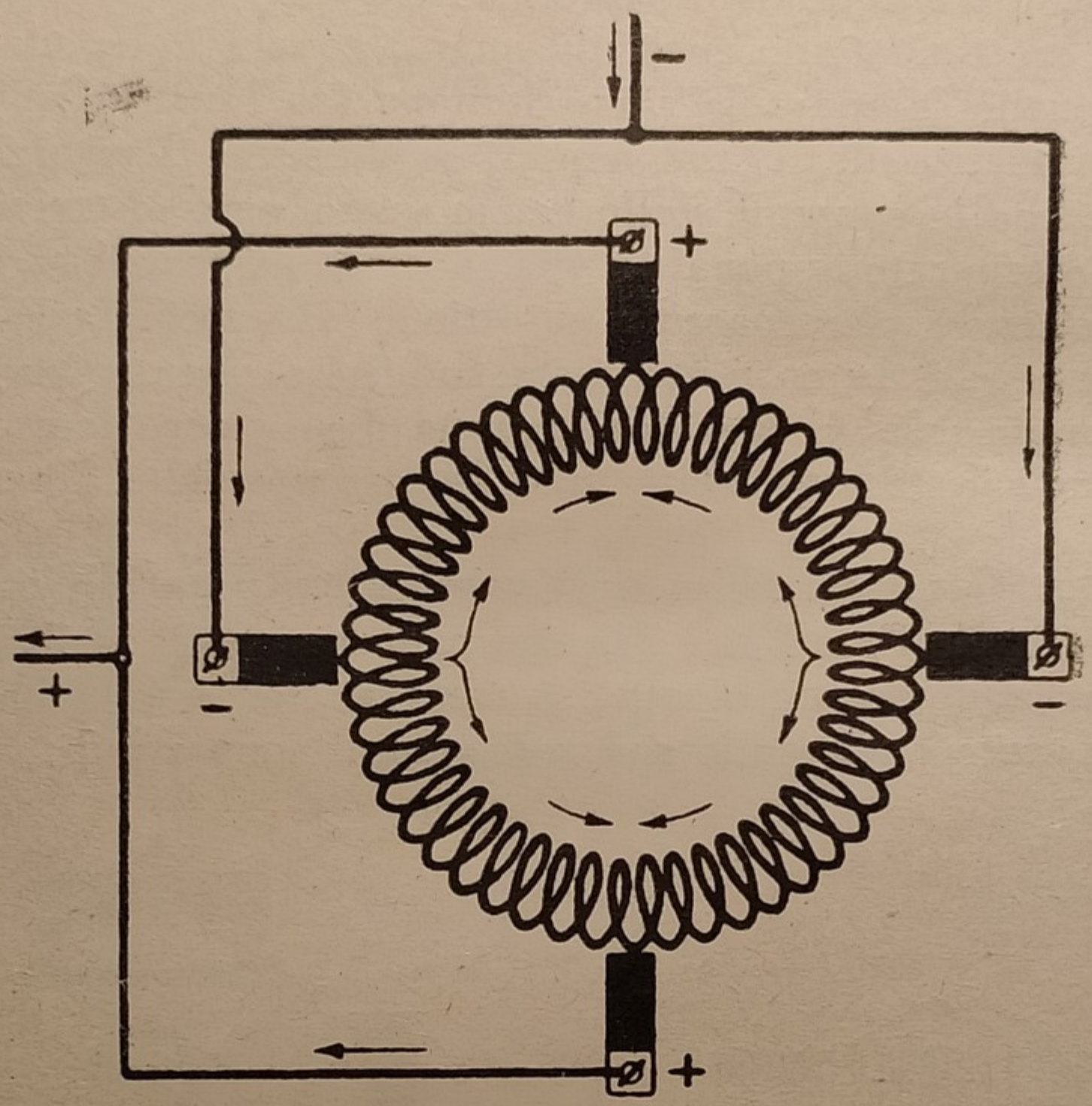


Fig. 248. - Schema di avvolgimento imbricato o parallelo per indotto a 4 poli.

Partendo da una lamella del collettore e seguendo il circuito d'avvolgimento in una direzione, la corrente entra per la estremità in una matassa e sorte dall'altra estremità la quale si attacca o alla lamella prima o alla lamella dopo quella di partenza. Nel primo caso l'avvolgimento è regressivo, nel secondo caso progressivo. Come effetto elettrico i due sistemi sono indifferenti.

Mentre nel sistema ondulato la f. e. m. è data dalla somma delle f. e. m. che si svolgono in una metà dei conduttori, nel sistema imbricato la f. e. m. è data da quella che si svolge in $N : p$ conduttori (dove N è il numero complessivo dei conduttori alla superficie dell'indotto e p il numero dei poli).

Quando un avvolgimento è fatto *a matasse* di filo, la posizione delle matasse sul nucleo a tamburo è uguale tanto con un sistema di avvolgimento che con l'altro. *La differenza fra i due metodi sta nel modo di connettere le estremità delle matasse del collettore.*

Il concetto fondamentale che deve regolare la larghezza delle matasse o sezioni è che esse devono abbracciare tutto il flusso di un polo; se i lati delle matasse fossero troppo stretti rispetto alla larghezza dei poli, in certi istanti si avrebbero f. e. m. nei due lati contrari ed il flusso non sarebbe utilizzato.

136. Avvolgimenti a matasse e a sbarre. — Avvolgimenti per indotti scanalati. — Gli avvolgimenti si fanno con filo di rame a sezione tonda o quadrata a spigoli arrotondati con copertura leggera isolante tessile; oppure, quando l'intensità di corrente è piuttosto grande in relazione al voltaggio, si fanno con delle sbarrette di rame o pezzi di corda, che vengono fasciate con nastro di cotone.

I fili o le sbarrette vengono messi nelle scanalature in due strati di matasse. (Figg. 249-250-251).

Figg. 249 - 250 - 251 - Numerazione delle sbarre o dei lati di matassa nei canali.

Nella fig. 249 abbiamo due sbarre per canale; nella fig. 250 si hanno 4 sbarre per canale; nella fig. 251, 6 sbarre per ogni canale. In ognuna di queste figure ogni sbarra può rappresentare anche un fascetto di fili costituenti un lato di sezione o di matassa.

Nelle piccole dinamo l'avvolgimento si può fare avvolgendo direttamente il filo sul nucleo o nelle scanalature così come si fa un gomitolo di spago, ed attaccando gli estremi al collettore nei due modi che abbiamo indicato e colle regole

che daremo. Ma assai più frequentemente nelle fabbriche le matasse di filo o le sbarre vengono piegate od avvolte sopra sagome di legno e fasciando poi con nastro ogni sezione. Le figg. 252-253 dànno la rappresentazione di sezioni semplici a sbarre ed a filo.

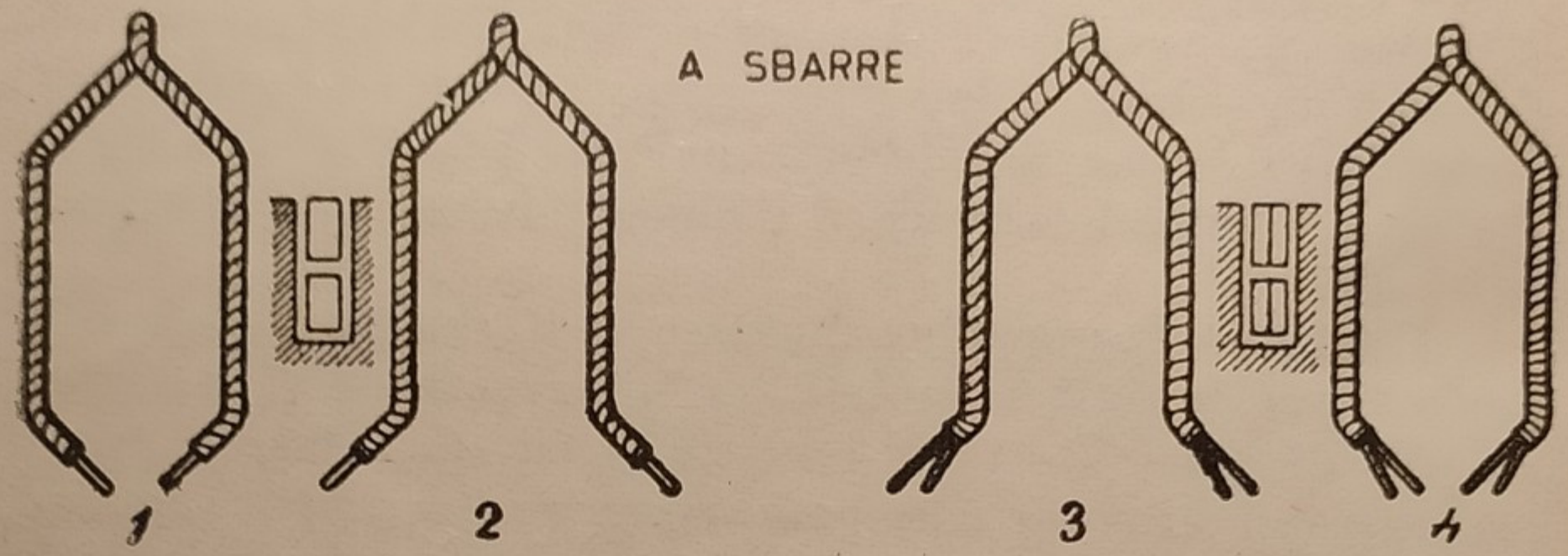


Fig. 252 - Sezioni di avvolgimento a sbarrette.

Spesso anzi, per risparmio di tempo e di mano d'opera, si costruiscono fasci di matasse per indotti scanalati formati da due o tre matasse elementari isolate le une dalle altre; cioè invece di mettere per esempio 4-6 lati di matasse separatamente in ciascun canale separati, si mettono *due zone* o fasci di matasse essendo ognuna composta di due o tre matasse o

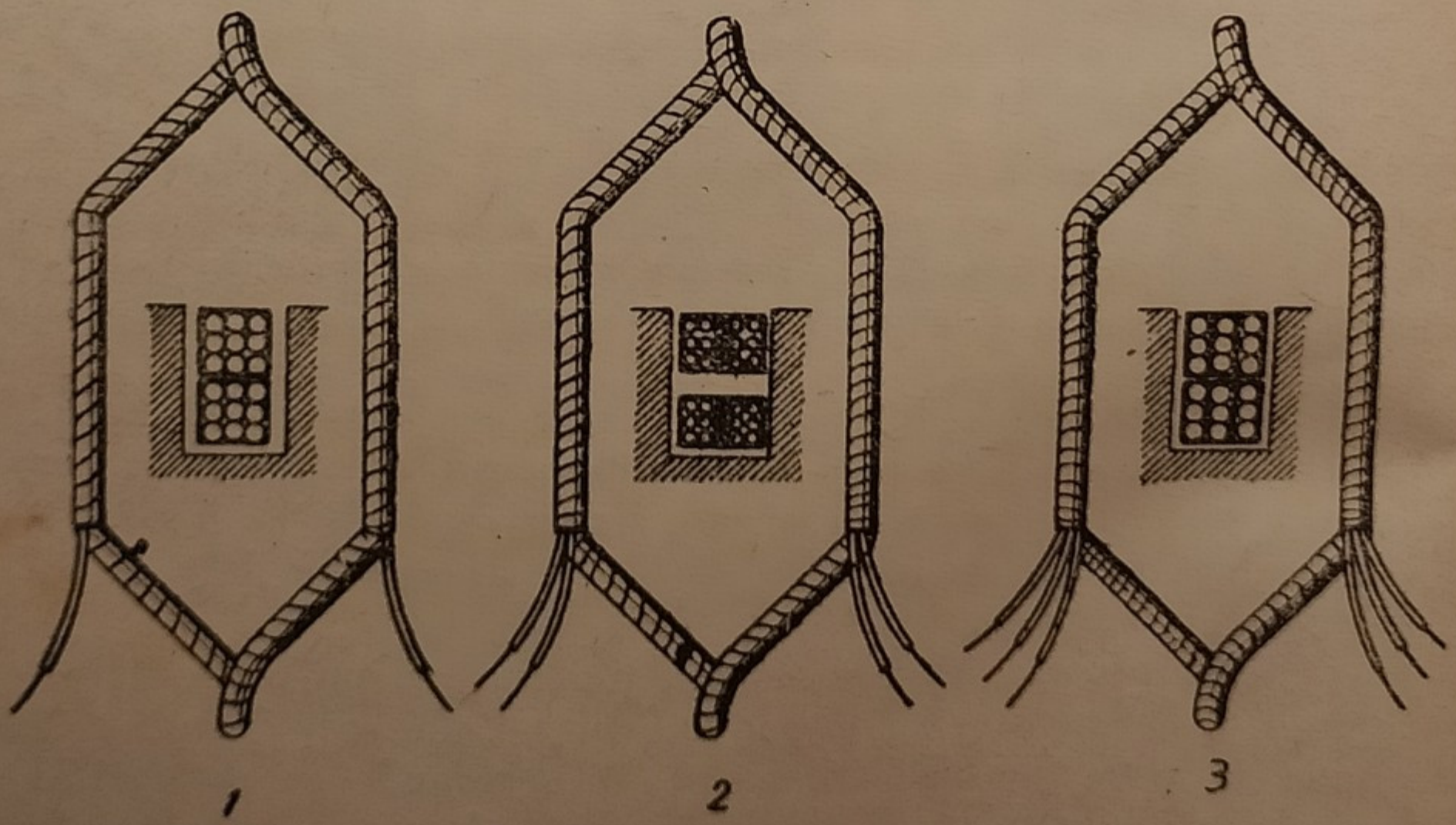


Fig. 253. - Zone di avvolgimento a zone con una, due e tre matasse.

sezioni. Le due zone si mettono sempre nella scanalatura una sull'altra.

Tali fasci di matasse si dicono *zone* o *bobine;* così una zona a due matasse od a due sbarrette ha 4 capi — una zona a tre matasse o tre sbarrette ha 6 capi. Per il montaggio di avvolgimenti con matasse o zone preparate a parte su sagome occorre che le scanalature siano aperte e di forma rettangolare. (Fig. 253).

Negli avvolgimenti con due matasse o zone per ogni scanalatura risulta sempre che tutte le matasse o zone occupano con un lato (per esempio a destra) la parte inferiore delle scanalature e coll'altro lato la parte superiore. (Fig. 254).

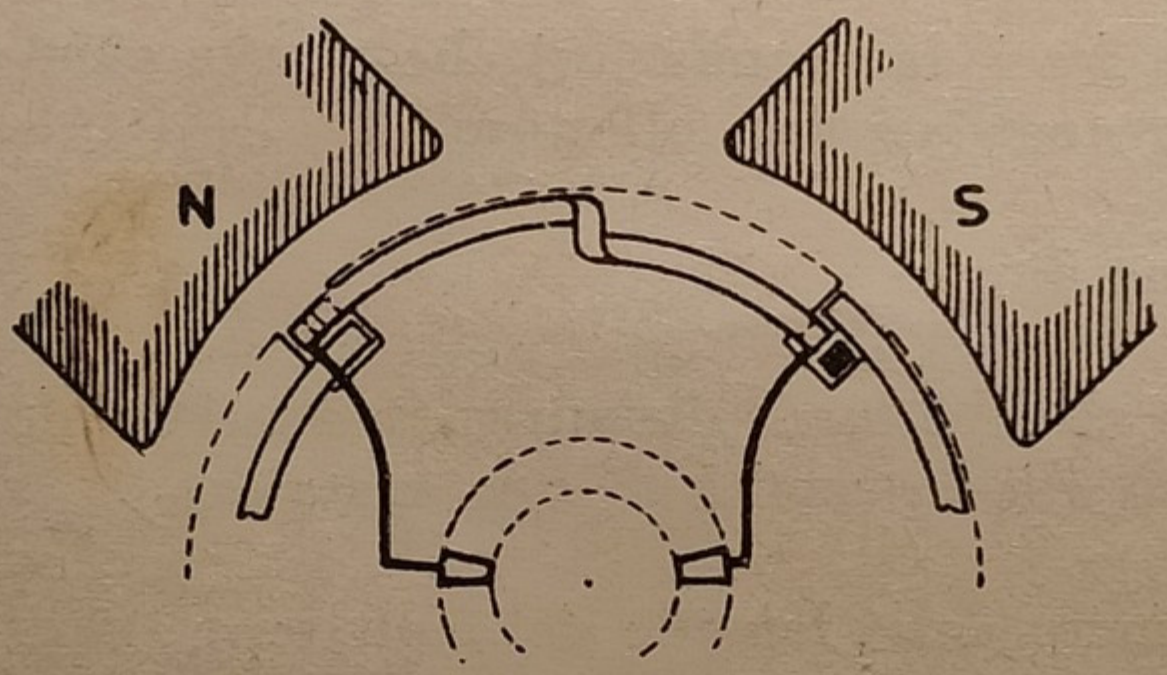


Fig. 254. - Disposizione di zone in scanalature viste di fronte.

137. Formole per gli avvolgimenti. — Si dice *passo* la distanza fra due elementi d'avvolgimento (conduttori, lamella di collettore, scanalature) che devono essere direttamente congiunti, essendo tale distanza espressa dal numero degli elementi interposti. Per esempio se si devono collegare le estremità di una matassa alla lamella 1 ed alla 16.a, diremo che il *passo al collettore* è 15. Se una matassa occupa coi suoi lati la scanalatura 1 e 10a, si dice che il *passo dei canali* è 9. Se un conduttore deve allacciarsi con quello che si trova al trentaduesimo posto contando 1 quello del conduttore di partenza si dice che il *passo dei conduttori* è 31.

Scopo delle formole è quello di dare le regole da seguirsi per fissare il passo dei conduttori, dei canali, delle lamelle che devono essere collegate nell'operazione dello avvol-

gimento in modo che le f. e. m. abbiano a sommarsi e che si possa ottenere un circuito chiuso.

Per individuare un avvolgimento si suppone siano dati: il numero delle lamelle, il numero dei conduttori o lati di matasse, il numero dei canali o scanalature. Fissati questi elementi si tratta di trovare il passo dei conduttori (o lati di matassa), il passo al collettore, il passo dei canali.

Riferendoci alle due figure 255-256 chiamiamo:

y = passo dei conduttori (o lati di matassa) sul lato opposto al collettore o fronte posteriore.

y_2 = passo fra i due conduttori che si attaccano ad una lamella qualsiasi del collettore.

y = somma di y_1 e y_2.

yc = passo al collettore (distanza fra due lamelle che si collegano alle estremità di una matassa).

z = il numero delle lamelle del collettore.

p = il numero dei poli.

n = il numero dei canali.

m = il numero degli elementi o lati di matassa per ogni canale.

b = un numero intero.

Per fissare il passo dei singoli elementi bisogna numerarli, cioè bisogna numerare il numero dei conduttori semplici o lati di matassa, le lamelle ed i canali. Quando in un canale vi sono due o più conduttori la numerazione si farà seguendo quella indicata dalle fig. 249, 250, 251.

Comunque sia l'avvolgimento si devono sempre osservare le seguenti regole:

1.° *I passi* y_1 *e* y_2 *devono essere numeri dispari e poco differenti fra di loro.*

2.° y *deve essere perciò un numero pari.*

3.° Essendo ad ogni lamella attaccate due estremità *il numero dei conduttori semplici o lati di matassa è sempre doppio del numero delle lamelle.*

4.° Se in un canale vi sono *m* elementi o lati di matassa semplici il numero dei canali - *n* - sarà:

$2z$ = se vi è un solo elemento per canale ($m = 1$).

z = se vi sono due elementi o lati di matassa per canale ($m = 2$).

$\frac{z}{2}$ = se vi sono 4 elementi ($m = 4$).

$\frac{z}{3}$ = se vi sono 6 elementi ($m = 6$).

$\frac{z}{4}$ = se vi sono 8 elementi ($m = 8$).

In altri termini se i conduttori per canale sono 1-2-4-6-8 il numero dei canali è rispettivamente:

$$2z\ ;\ z\ ;\ \frac{z}{2}\ ;\ \frac{z}{3}\ ;\ \frac{z}{4}$$

In ogni caso si ha:

$$n \times m = 2z$$

1.° AVVOLGIMENTO ONDULATO OD IN SERIE. *In questo avvolgimento si deve verificare:*

$$y = y_1 + y_2 = \frac{2z \pm 2}{\frac{p}{2}}$$

$$yc = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{2z \pm 2}{p}$$

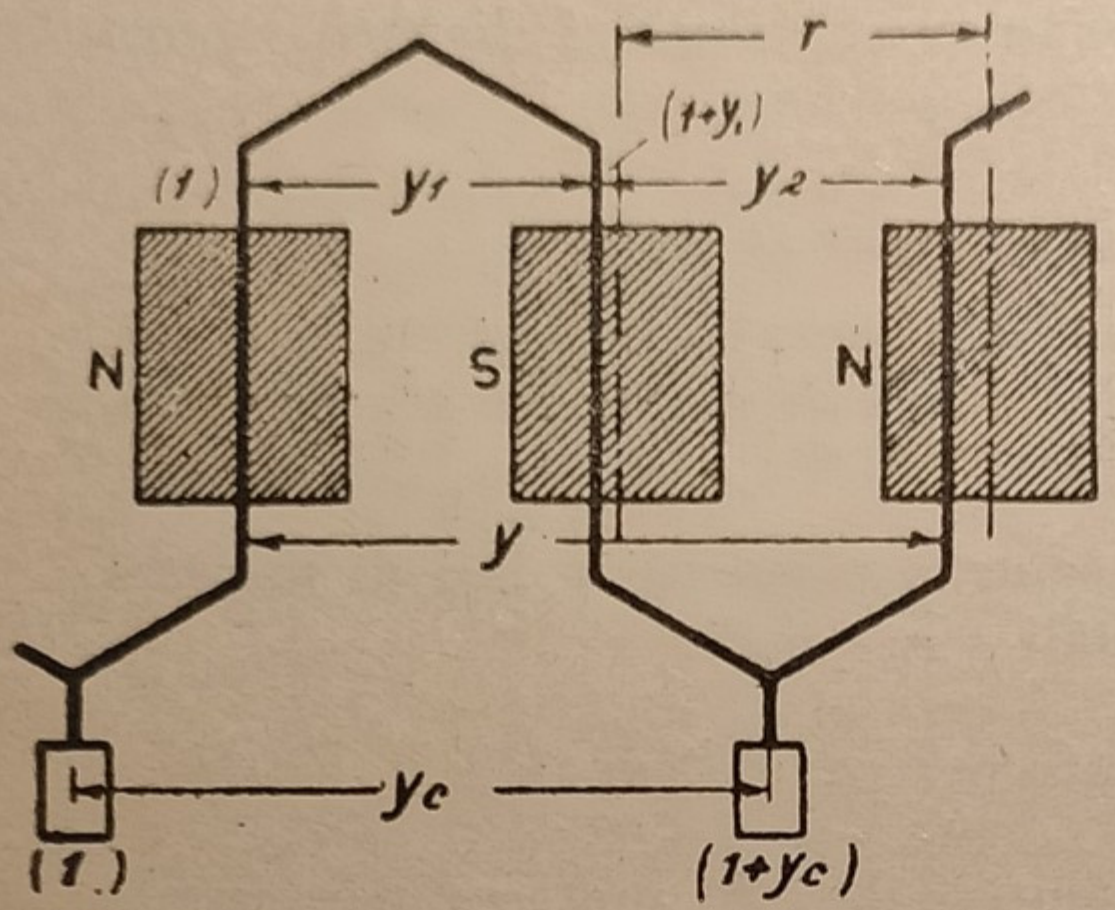


Fig. 255.

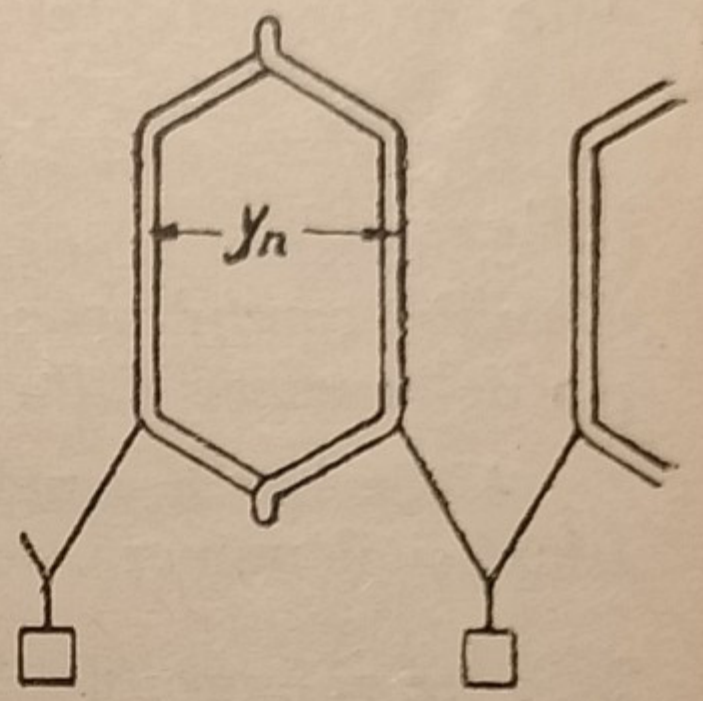


Fig. 256.

Avvolgimenti ondulati.

Il segno + corrisponde all'avvolgimento progressivo; il segno — all'avvolgimento regressivo.

Il passo dei canali è fissato dai valori scelti di y_1 e y_2; perciò si disegnano i canali e gli elementi di ogni canale; si fa la numerazione e dai valori y_1 e y_2 si vede se i lati di matassa corrispondono ai canali assegnati. Si può usare della formola:

$$yn = \frac{y_1 - 1}{m}$$

Nel contare il passo si prosegue sempre nello stesso senso, sia si tratti di y_1 che di y_2 che di yc.

Dalla formola precedente deve risultare y_n numero intero; perciò si deve scegliere y_1 che è arbitrario in modo che questa condizione sia soddisfatta.

Dalla formola:

$$yc = \frac{2z \pm 2}{p},$$

si deduce che se $p = 2$ poli

$$yc = z \pm 1;$$

questa condizione è sempre soddisfatta sia che il numero delle lamelle sia pari o sia dispari.

Se la *dinamo è a 4 poli* allora si ha:

$$yc = \frac{2\,z \pm 2}{4} = \frac{z \pm 1}{2}$$

Per soddisfare a questa relazione occorre che *il numero delle lamelle z sia dispari.*

Se vi sono due lati di matassa per canale dovendo i canali essere uguali alle matasse risulta che per le dinamo a 4 poli i canali dovranno pure essere dispari.

Se vi sono 4 lati di matassa per canale i canali dovrebbero essere metà delle lamelle; ma essendo queste dispari non è possibile riempire tutti i canali. Si usa di fare una matassa *morta* o di riempitivo nell'avvolgimento, cioè senza attacchi al collettore.

Passiamo ora alla *dinamo a 6 poli*. In tal caso la succitata formola diventa:

$$yc = \frac{z \pm 1}{3}$$

Ossia siccome yc deve essere un numero intero, $z + 1$ deve essere divisibile per 3.

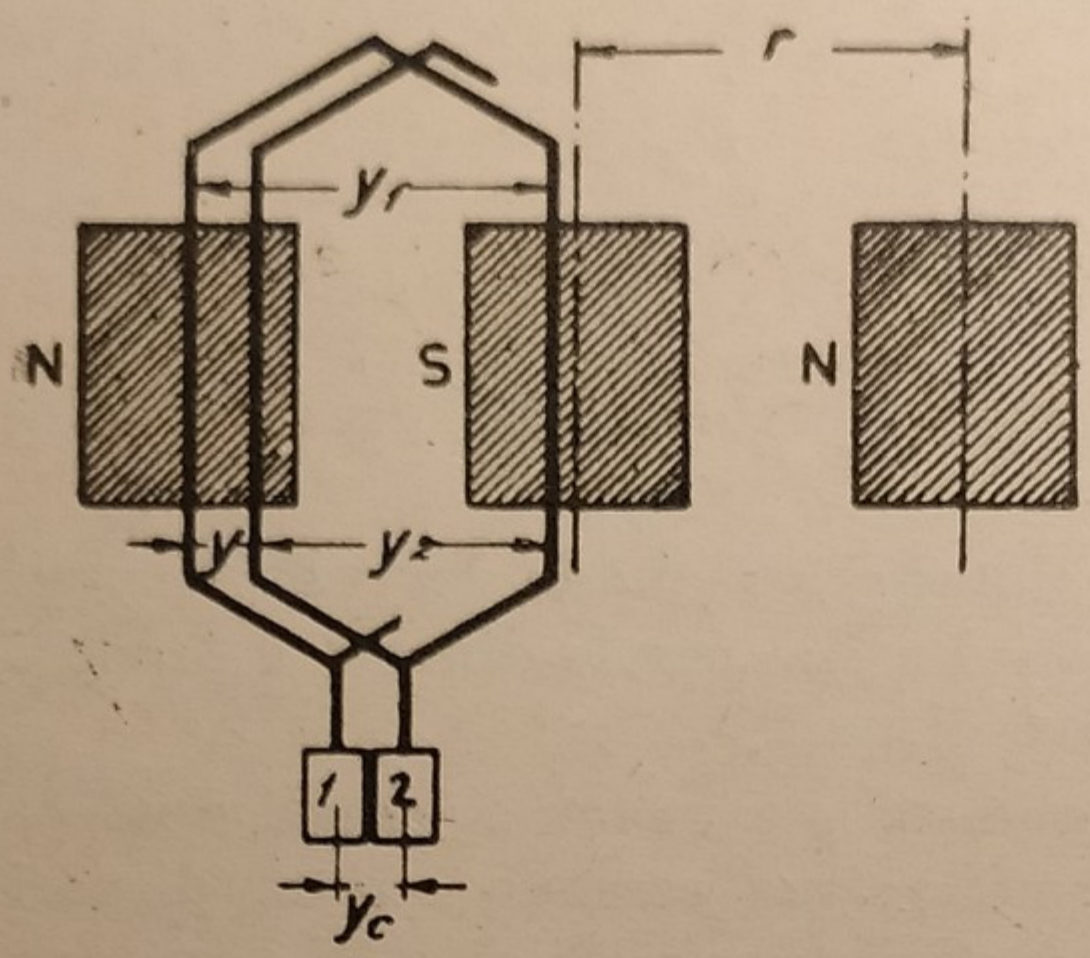
2.° AVVOLGIMENTO IMBRICATO O PARALLELO. Riferendoci alla figura 257-258 si ha la seguente regola:

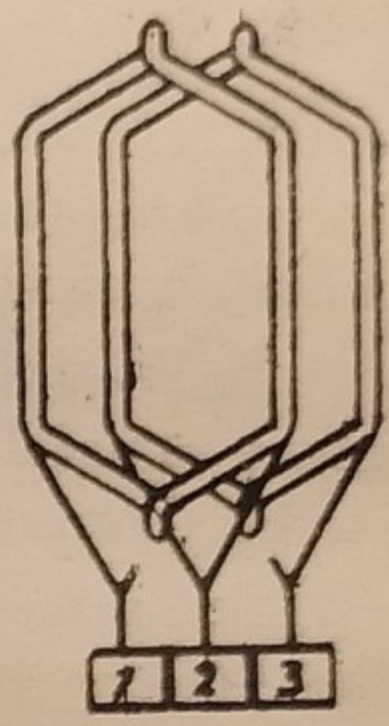
$$y = y_1 - y_2 = \pm 2$$

$$y_1 = \frac{2\,z - b}{p} \pm 1 \qquad yc = \pm 1$$

$$y_2 = \frac{2\,z - b}{p} \mp 1$$

Se y_1 è $>$ di y_2 l'avvolgimento è progressivo; se è minore è regressivo.





Figg. 257 - 258 - Avvolgimenti imbricati.

Il numero *b* può essere scelto ad arbitrio tra 0 e 10 o 12. Se l'avvolgimento è fatto in canali bisogna scegliere *b* in modo che soddisfi alle regole date per la determinazione del passo dei canali. Per questo passo valgono ancora le regole date per gli avvolgimenti ondulati.

I passi y_1 *e* y_2 *si devono contare uno in un senso e l'altro in senso contrario e devono essere dispari.*

138. Esempi di avvolgimenti. — Gli avvolgimenti di qualsiasi genere si possono rappresentare anche con *tabelle di avvolgimento* nelle quali si mettono dei numeri che indicano i posti dei conduttori, delle lamelle, dei canali percorsi dalla corrente partendo da un posto di lamella chiamato 1.

1.° ESEMPIO. — Avvolgimento ondulato per dinamo a due poli (p = 2) con 15 lamelle (Z = 15) 15 canali (n = 15) 2 elementi per canale (m = 2).

Si ha:

$$y_1 + y_2 = \frac{2\,z \pm 2}{p/2} = \frac{30 \pm 2}{1} = 32 \text{ oppure } 28$$

Si sceglie 28 e si fa:

$$y_1 = 15 \qquad y_2 = 13 \qquad y\,n = 7 \qquad y\,c = 14$$

(Numerazione nel senso dell'orologio).

dalla lamella	al conduttore	posto nel canale	al conduttore	posto nel canale	alla lamella
1	1	1	16	8	15
15	29	15	14	7	14
14	27	14	12	6	13
13	25	13	10	5	12
. . . .	. . . .	. . . .	. . . .	. . . .	. . . .

2.° ESEMPIO. — Avvolgimento ondulato per dinamo 4 poli — 99 lamelle — 33 canali — 6 (m) elementi di matassa per canale.

$$y_1 + y_2 = \frac{2 \times 99 \pm 2}{4,2} = 99 \pm 1 = 100 \text{ oppure } 98$$

Si sceglie 98 e si fa:

$$y_1 = y_2 = 49$$

Passo al collettore:

$$y.c = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{98}{2} = 49 \qquad y\,n = \frac{y - 1}{6} = \frac{49 - 1}{6} = 8$$

dalla lamella	al conduttore	nel canale	al conduttore	nel canale	alla lamella
1	1	1	50	9	50
50	99	17	148	25	99
99	197	33	48	8	49
49	97	16	146	24	98
98	195	32	46	7	48
. . . .	. . . .	. . . .	. . . .	. . . .	. . . .

3.° ESEMPIO. — Avvolgimento imbricato o in parallelo — 8 poli — 288 lamelle — 4 elementi o lati di matassa per canale — 144 canali.

$$y_1 = \frac{288 \times 2}{8} + 1 = 73 \qquad y_2 = 71 \qquad y\,n = \frac{73 - 1}{4} = 18$$

dalla lamella	al conduttore	nel canale	al conduttore	nel canale	alla lamella
1	1	1	74	19	2
2	3	1	76	19	3
3	5	2	78	20	4
4	7	2	80	20	5

Esercitazioni. Disegnare i seguenti avvolgimenti:

1.° Dinamo a 2 poli; 12 lamelle; 24 canali.

2.° Dinamo a 2 poli; 14 lamelle; 14 canali; 2 elementi per canale.

3.° Dinamo a 4 poli; 16 lamelle; 16 canali; 2 elementi per canale; imbricato.

4.° Dinamo a 6 poli; 45 lamelle; 45 canali; 2 elementi per canale; imbricato.

5.° Dinamo a 6 poli; 22 lamelle; 22 canali; 2 elementi per canale; ondulato.

139. Avvolgimenti serie-parallelo e doppio-parallelo — Oltre agli avvolgimenti serie e parallelo esaminati si usano, quantunque di raro, degli avvolgimenti *serie-parallelo* ed il *doppio-parallelo*. L'avvolgimento serie-parallelo è un ondulato disposto in modo che partendo da una lamella e seguendo le connessioni dopo un giro invece di arrivare alla lamella

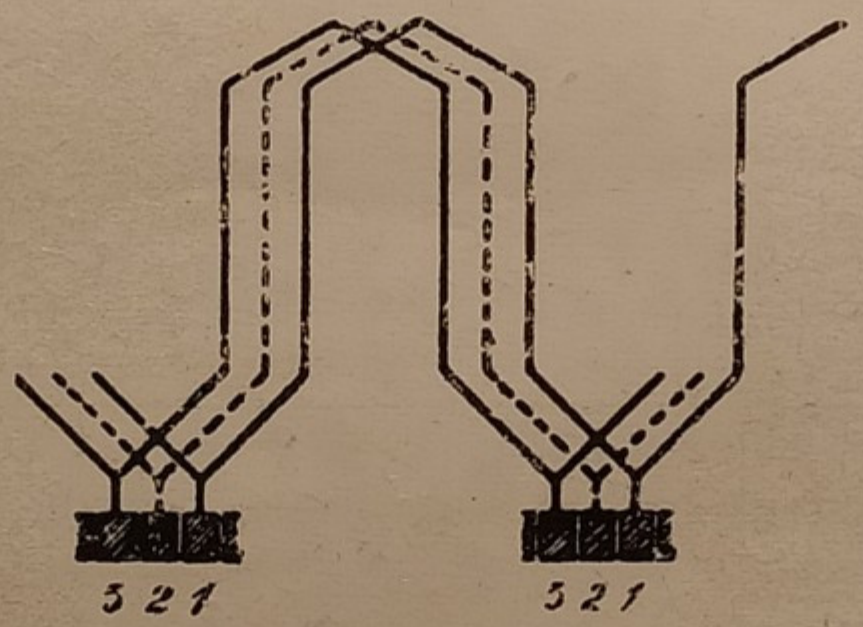


Fig. 259. - Avvolgimenti serie-parallelo.

prima o successiva a quella di partenza si arriva a due lamelle prima o dopo. (Fig. 259). Proseguendo l'avvolgimento si chiude ancora. In tal caso le spazzole devono abbracciare due la-

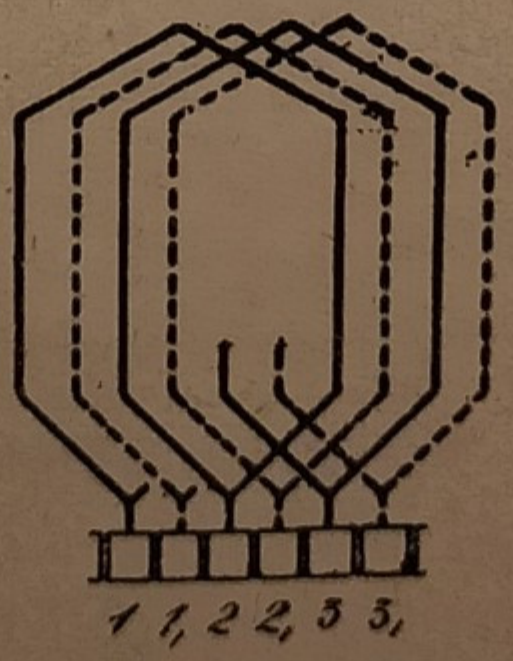


Fig. 260. - Avvolgimento in doppio parallelo.

melle e la corrente invece di suddividersi in due rami, si suddivide in 4 rami.

Il doppio parallelo è formato da due imbricati semplici accostati in modo che una lamella appartiene ad uno dei circuiti; la successiva all'altro, la terza al primo e così via. (Fig. 260).

140. Eccitazione delle dinamo e loro regolazione. — Gli elettromagneti che creano il campo induttore bipolare o multipolare delle dinamo possono essere eccitati o da una corrente indipendente oppure possono essere eccitati da una corrente presa dall'indotto della stessa macchina.

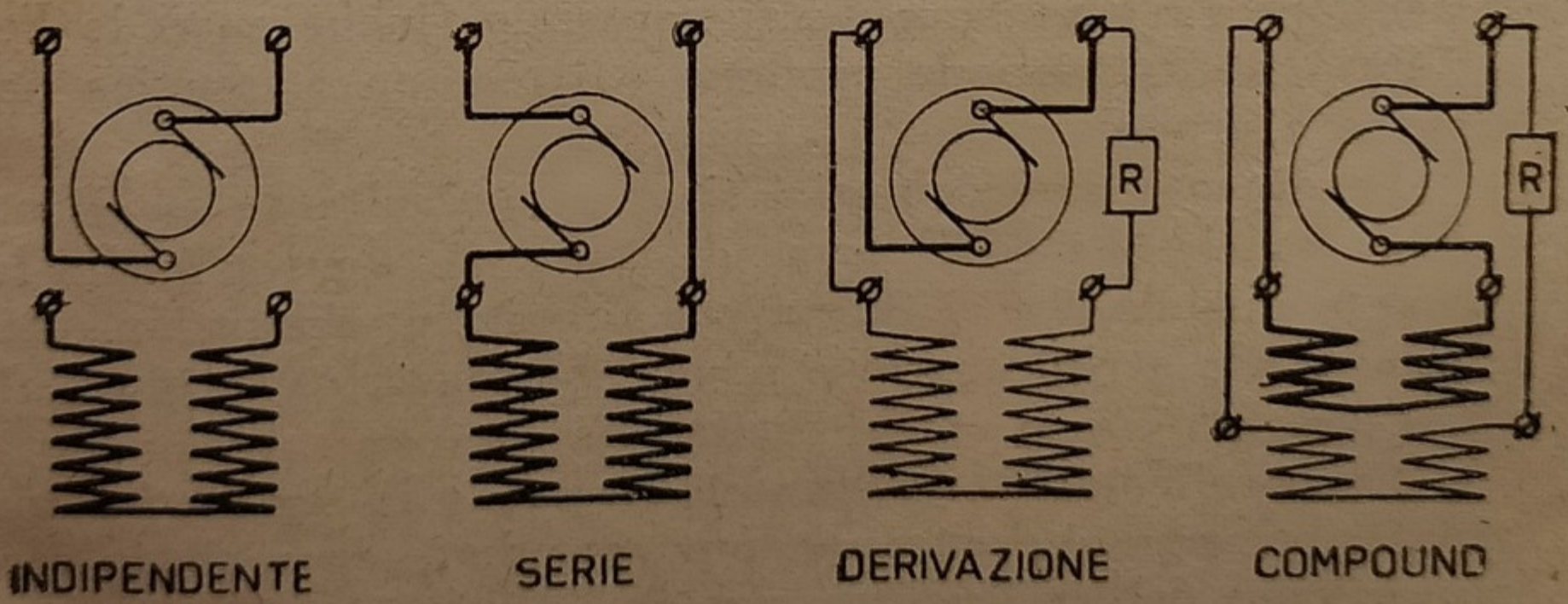
Nel primo caso le dinamo si dicono ad *eccitazione indipendente* (fig. 261), nel secondo caso *dinamo autoeccitatrici*. Le dinamo autoeccitatrici possono essere:

1.° *ad eccitazione in serie;*

2.° *ad eccitazione in derivazione;*

3.° *ad eccitazione in compound.*

Nelle dinamo ad eccitazione in serie, dette brevemente *dinamo in serie* il circuito di eccitazione del campo induttore è percorso da tutta la corrente prodotta dall'indotto e cioè il circuito esterno, il circuito di eccitazione del campo e l'indotto sono in serie e formano un sol circuito chiuso. (Fig. 262).



Figg. 261 - 262 - 263 - 264 - Eccitazioni indipendente, in serie, in derivazione e compound. R indica il regolatore o reostato del campo.

Nelle dinamo ad eccitazione in derivazione il circuito che eccita i poli induttori è in derivazione sulle spazzole e sul circuito esterno; circuito esterno, eccitazione dei poli ed indotto formano tre circuiti in parallelo fra loro. (Fig. 263).

Nelle dinamo compound o composta l'eccitazione dei poli induttori è ottenuta con due correnti: l'una in serie e l'altra in derivazione; la macchina ha i caratteri derivanti dai due tipi di eccitazione in serie e in derivazione (Fig. 264).

Fra i quattro sistemi più usati nella pratica sono: quello in derivazione e quello compound; le macchine ad eccitazione in serie sono più adoperate come motori, specialmente di trazione, che come dinamo; le dinamo ad eccitazione indipendente sono usate in casi speciali, p. e., per grosse dinamo di elettrolisi a bassissimo voltaggio e grandissime intensità.

La *regolazione della tensione* delle dinamo si ottiene variando il campo magnetico induttore e cioè la corrente di eccitazione del campo. Perciò tutte le dinamo in derivazione e compound sono munite di resistenze o reostati variabili a mezzo di contatti inseriti in serie sul circuito di eccitazione del campo.

141. Adescamento delle dinamo. - Senso di rotazione e polarità. — Quando si mette in moto una dinamo autoeccitatrice, se i circuiti sono chiusi, si produce una piccolissima tensione dovuta al *magnetismo residuo* nei pezzi di ferro polari. Questa tensione suscita una piccola corrente che circolando (in serie o in derivazione) nel circuito di eccitazione intensifica il magnetismo. *Così la macchina si adesca;* la tensione va gradatamente aumentando finchè succede l'equilibrio fra la tensione prodotta e il campo magnetico necessario a produrla.

Le dinamo autoeccitatrici si adescano soltanto se gli attacchi dei circuiti od il senso di rotazione sono tali che la corrente iniziale che si forma nel circuito di eccitazione del campo tende a rinforzarlo e non a distruggerlo. In quest'ultimo caso la dinamo non si eccita più.

Se una dinamo di nuova installazione o in seguito ad una riparazione non si eccita più, pur essendo le spazzole in corrispondenza dell'asse neutro, possono darsi diversi casi:

1.° che la dinamo abbia perduto il suo magnetismo re-

siduo. Si prova a eccitarlo inviando nel solo circuito del campo la corrente momentanea di un accumulatore.

2.° che non siano giusti gli attacchi. Si prova a staccare il circuito di eccitazione dal circuito dell'indotto e scambiare la posizione.

3.° che il circuito d'eccitazione sia interrotto e cioè guasto.

4.° che vi sia molta resistenza nelle spazzole di carbone. Si prova a premerle con forza.

Se la dinamo è in derivazione e con poli ausiliari nel caso che si debbano scambiare gli attacchi del campo magnetico bisogna scambiare anche quelli dei poli ausiliari onde la corrente possa circolare in senso contrario.

142. Curve caratteristiche delle dinamo. — Il mezzo più semplice per esprimere il comportamento delle dinamo consiste nel tracciare le loro *curve caratteristiche*. Queste curve si ottengono col sistema delle coordinate cartesiane portando sugli assi delle ascisse e delle ordinate i valori degli elementi che interessano queste macchine ossia: corrente di eccitazione, f. e. m., intensità nel circuito esterno, velocità ecc. Fra le diverse curve che si possono tracciare la più importante è la *caratteristica di magnetizzazione o caratteristica interna* od anche *statica* poichè da questa si può rilevare come varia per una determinata macchina la tensione in funzione

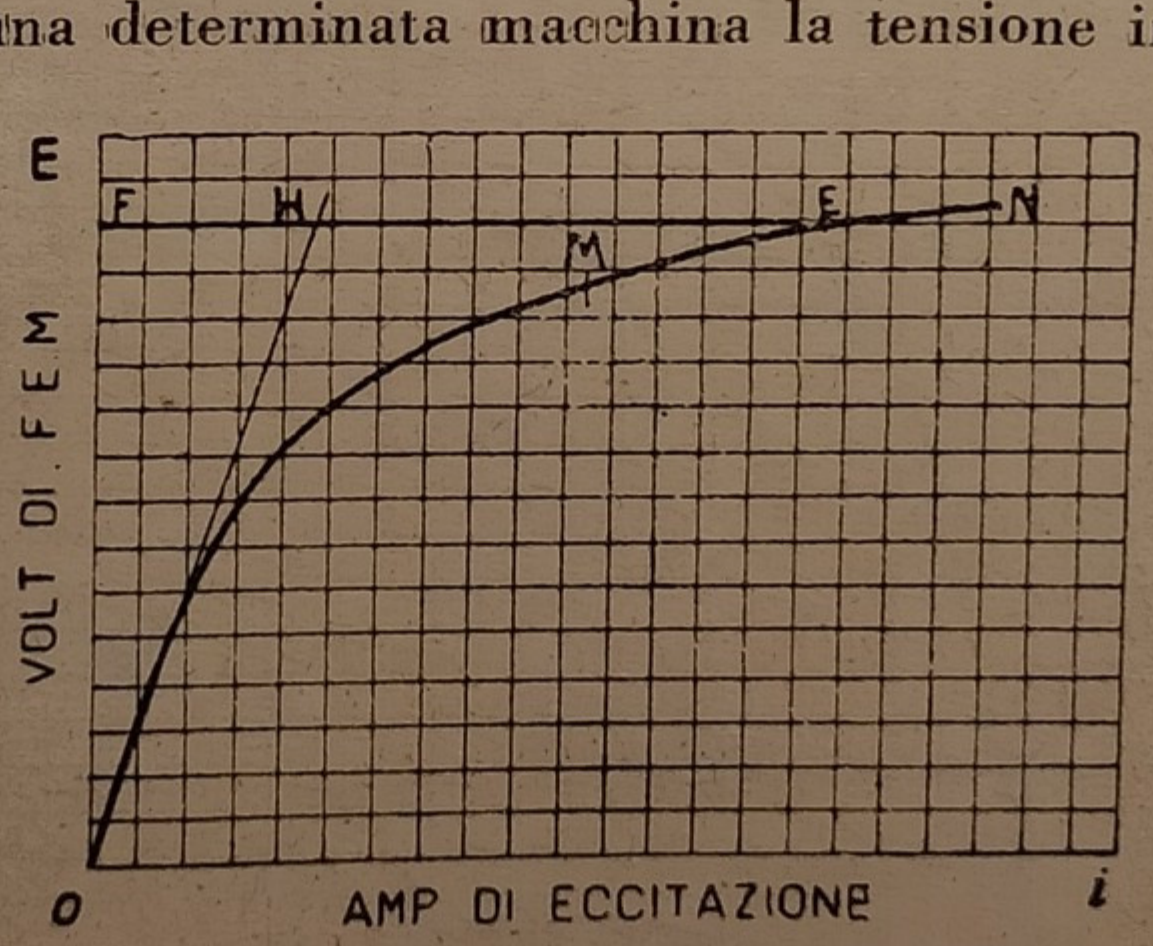


Fig. 265 . Curva caratteristica a vuoto o di magnetizzazione.

della corrente di eccitazione del campo. Per tracciare questa curva si fa ruotare la dinamo a studiarsi con velocità costante e si notano per ogni valore crescente della intensità *i* di eccitazione, ottenuta a mezzo di una sorgente separata (dinamo o accumulatori) i valori corrispondenti della f. e. m. E ai morsetti. (Fig. 265). *Il circuito esterno deve essere interrotto*, e la corrente di eccitazione deve percorrere i soli circuiti (in derivazione o in serie) del campo magnetico.

Siccome con questa esperienza il numero dei giri è costante la curva della f. e. m. sarà esattamente proporzionale al flusso Φ di linee di forza tagliate dai fili di avvolgimento. Ossia, con altra scala, la stessa curva rappresenta il valore dell'induzione magnetica B media nell'interferro. Per ogni dinamo si possono tracciare diverse caratteristiche di magnetizzazione corrispondenti a diverse velocità. Queste caratteristiche hanno il perfetto andamento delle curve di magnetizzazione accennate nel parag. 59 e si compongono di un tratto rettilineo e di una curva che tende a mettersi assintottica coll'asse delle ascisse.

Chiudendo il circuito esterno di una dinamo questa dà corrente. Allora una parte della tensione interna viene assorbita dalla resistenza dei conduttori di avvolgimento; inoltre la reazione d'indotto provoca un indebolimento del campo.

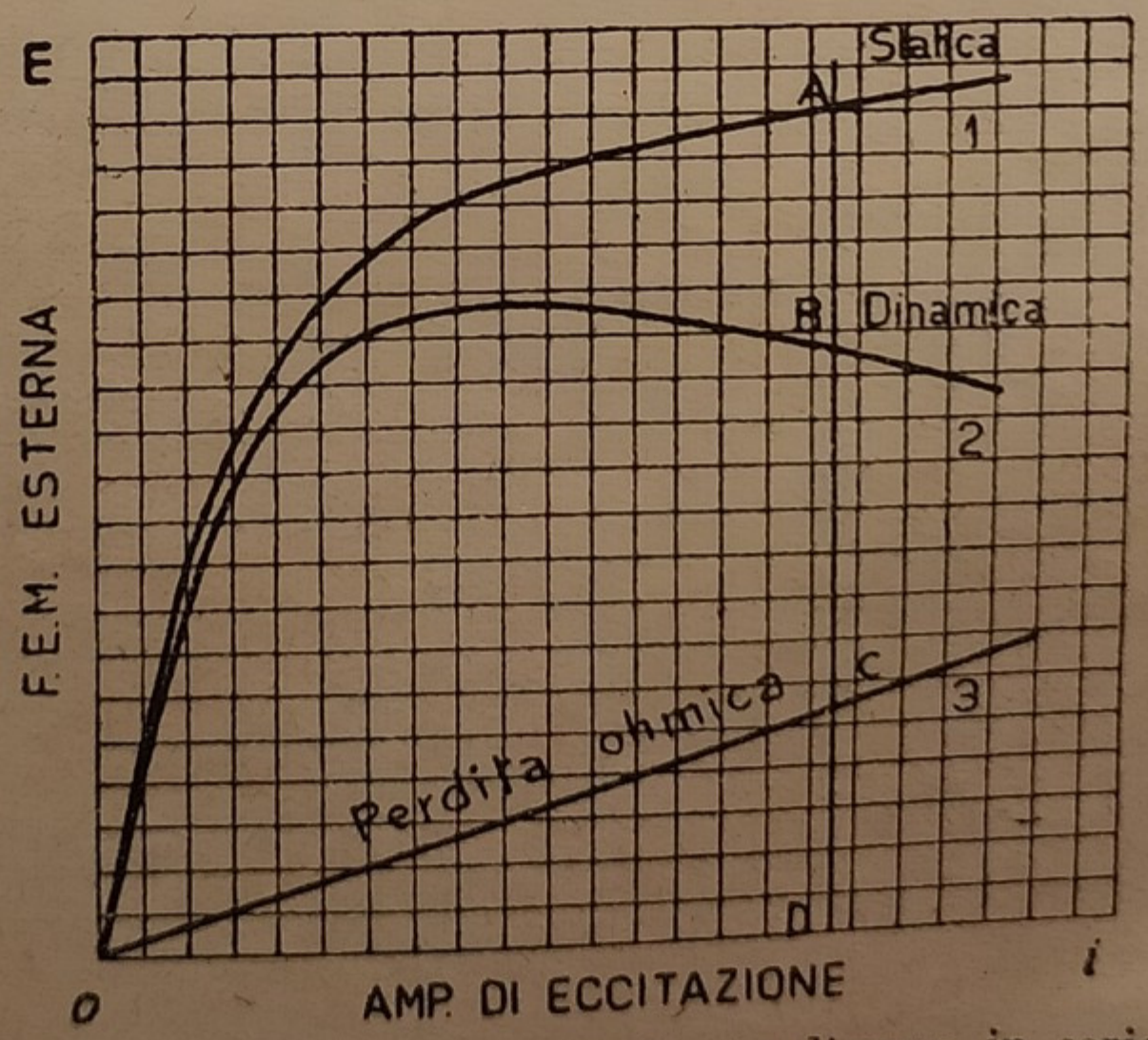


Fig. 266. . Curve caratteristiche in dinamo in serie.

Perciò a velocità costante la tensione ai morsetti si abbassa mano mano che aumenta il carico in ampère.

Si può tracciare una seconda curva avente per ordinate la tensione in volt ai morsetti e per ascisse le intensità corrispondenti, tenendo fisso il regolatore di eccitazione del campo. Questa seconda curva si chiama *caratteristica esterna od a circuito chiuso*. La fig. 268 rappresenta lo schema del circuito e istrumenti per fare il rilievo delle curve di una dinamo in derivazione. Il carico in ampère si varia mediante una resistenza R a spirali oppure a liquido; la intensità si rileva col amperometro A e la tensione ai morsetti col voltmetro V. Di solito si rileva anche l'intensità del circuito di eccitazione del campo con un amperometro A^1.

La fig. 266 rappresenta le caratteristiche interna ed esterna di una dinamo in serie; la curva sale da zero ad un massimo poi si abbassa prima lentamente poi rapidamente. La differenza AB in corrispondenza di un'ordinata qualsiasi AD misura la *caduta* o *variazione* della tensione da carico zero a pieno carico dovuta alla resistenza ohmica dei circuiti interni e alla reazione di armatura. La retta OC rappresenta la caduta nei detti circuiti. Perciò la differenza fra AB e DC rappresenta la caduta di tensione dovuta alla reazione.

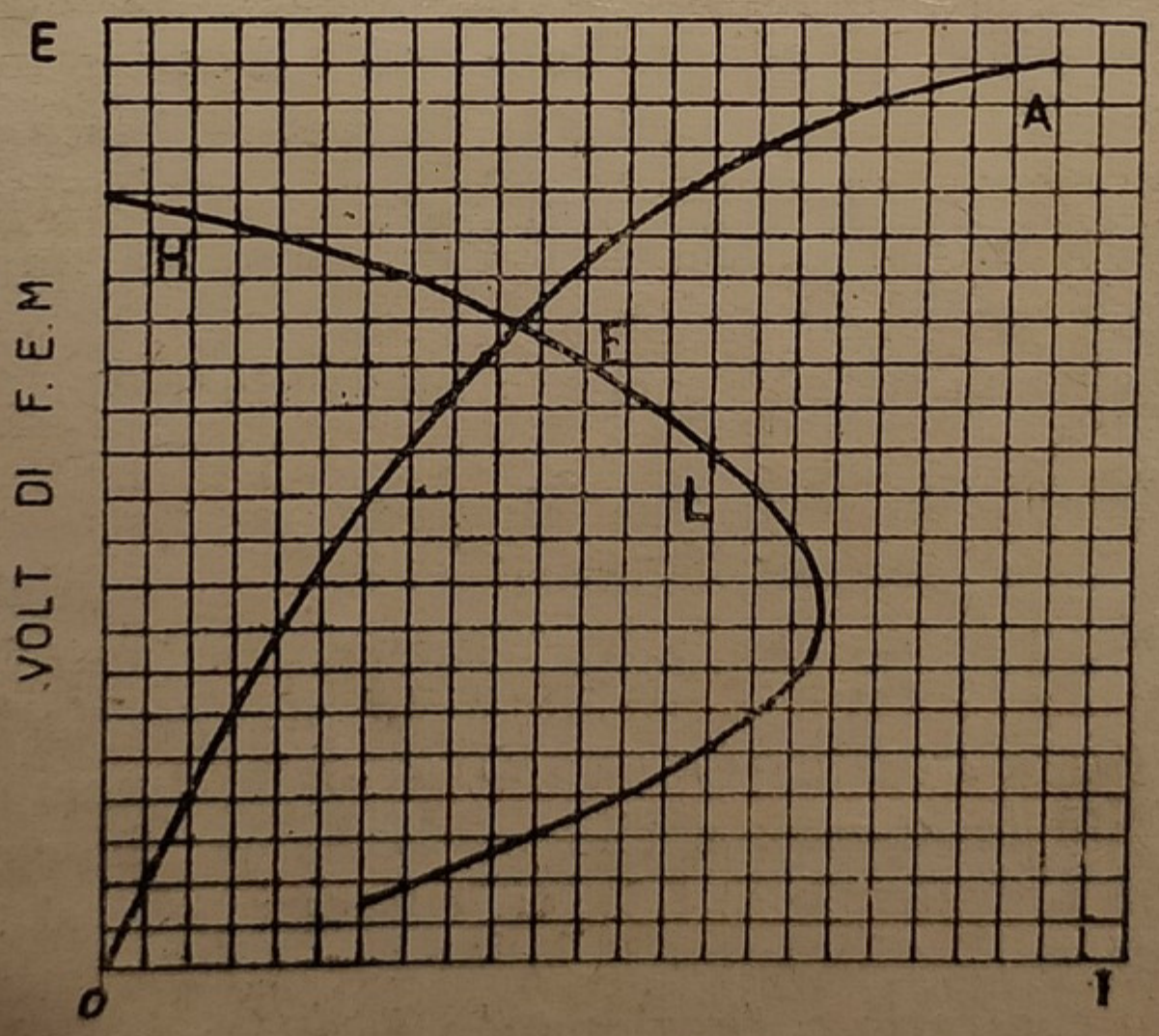


Fig. 267. - Caratteristiche interna e totale di una dinamo in derivazione.

La fig. 267 dà l'idea della caratteristica esterna (H E L) di una dinamo in derivazione portando come ordinate la tensione ai morsetti e come ascisse le intensità. La curva OA rappresenta invece la caratteristica interna od a circuito aperto.

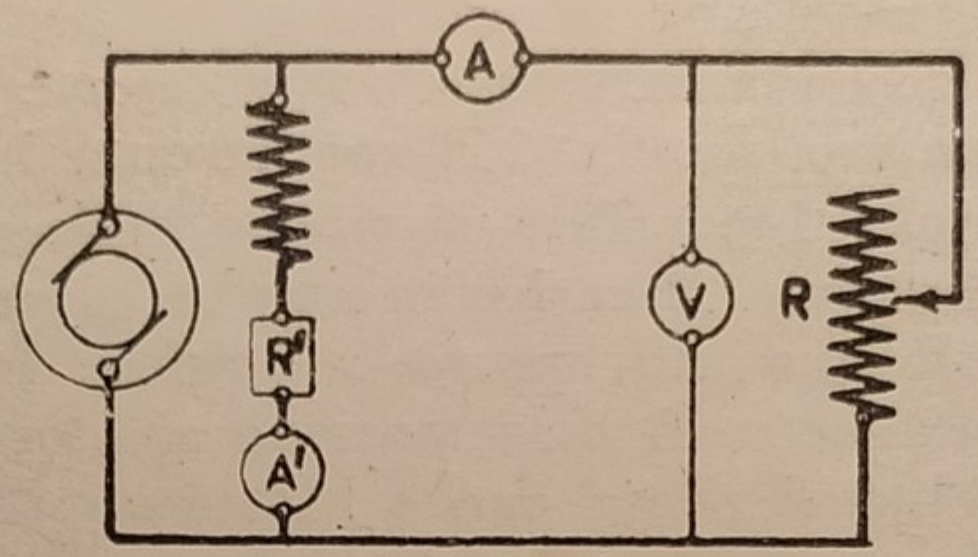


Fig. 268. - Schema dei circuiti per determinare le curve caratteristiche

Si osserva che la caratteristica esterna a partire da carico zero amp. si abbassa continuamente. Ad un certo punto la tensione cala rapidamente insieme alla intensità, riducendosi a zero quando si mettono i morsetti in corto circuito.

143. Impiego e comportamento dei diversi tipi di dinamo. — Nelle *dinamo in serie*, supposto costante il numero dei giri, la tensione dipende unicamente dalla corrente prodotta dalla macchina che serve anche di eccitazione del campo. La tensione quindi oscilla secondo il carico in ampères della macchina. Crescendo molto la corrente il ferro si satura; allora la tensione non aumenta più, anzi essa diminuisce per la preponderanza della reazione d'armatura, la quale, come sappiamo, ha azione diseccitante.

Le dinamo in serie si eccitano solo chiudendo il circuito esterno.

Una dinamo in serie che alimenta un circuito esterno nel quale sono inseriti in derivazione accumulatori, apparecchi elettrolitici, od altre dinamo, ha un funzionamento instabile. Infatti se per un incidente qualsiasi durante la marcia, facile a verificarsi, la f. e. m. della dinamo avesse a subire un abbassamento, anche momentaneo, la corrente si invertirebbe prevalendo la f. e. m. contraria che si trova nel circuito esterno. La dinamo in serie tornerebbe ad eccitarsi ma in senso contrario e, funzionando da motore, andrebbe ad assumere una fortissima velocità assorbendo una grande corrente. Si creerebbe un regime di corto circuito, e cioè assai

pericoloso per il surriscaldamento dei circuiti e per eccessiva velocità.

Per questi motivi la dinamo in serie non si presta nè per la carica degli accumulatori, nè per la marcia in parallelo con altra dinamo, a meno che non vi siano dispositivi automatici che abbiano ad impedire l'inversione della corrente di campo.

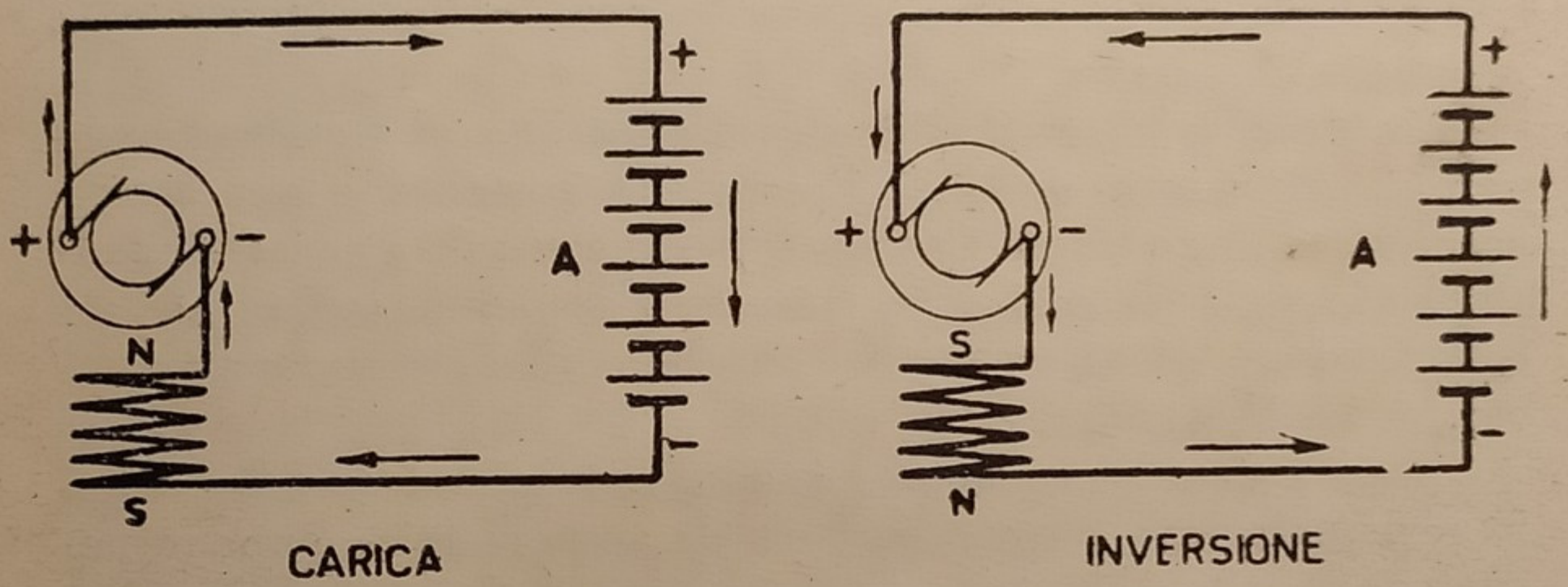


Fig. 269. - Dimostrazione perchè una dinamo in serie non si può impiegare per la carica degli accumulatori.

Le dinamo in serie si possono accoppiare soltanto in serie fra loro.

Le macchine in serie sono affatto disusate come generatrici. Sono invece largamente usate come *motori* per trazione elettrica tramviaria e ferroviaria. Ma del comportamento dei motori si parlerà in apposito paragrafo.

Nelle *dinamo in derivazione* la direzione e intensità del flusso magnetico dipendono dalla tensione sviluppata dalla armatura. Se il numero dei giri è costante la f. e. m. rimane quasi costante, pur variando il carico in ampère. Cioè la tensione è quasi indipendente dal carico in ampères nei limiti pratici di uso. La dinamo in derivazione è quindi una macchina a tensione quasi costante. Passando dal carico di zero ampère al carico massimo la tensione si abbassa lievemente (5-10%) per effetto Joule nei conduttori di avvolgimento e per la reazione d'armatura.

Se si sovraccarica una dinamo in derivazione (non in parallelo con altre) l'intensità cresce fino a un certo limite, poi per la preponderanza della reazione d'armatura la tensione della macchina si abbassa rapidamente.

Ciò succede quando si mettono in corto circuito queste dinamo (dato però che per eccesso di corrente gli avvolgimenti non avessero a bruciarsi prima).

Le dinamo in derivazione si prestano per fare la carica degli accumulatori perchè, se anche la tensione per una causa qualunque tendesse ad abbassarsi, la batteria farà funzionare la macchina come motore, *ma resta però sempre invariata la polarità del campo*,

Le dinamo ad eccitazione in derivazione si prestano bene per alimentazione di linee a tensione costante e per essere accoppiate in quantità. Così in tutte le centrali a corrente continua, quando il carico in ampères aumenta nella rete di distribuzione, si attaccano in parallelo diverse dinamo a seconda del bisogno.

Le *dinamo compound* hanno l'avvolgimento del campo in serie calcolato con un numero di ampère-spire appena necessario per compensare l'azione smagnetizzante della reazione d'armatura. Ma la preponderanza del flusso magnetico è assicurata dall'avvolgimento in derivazione di eccitazione del campo. Quindi queste dinamo danno una tensione assolutamente costante comunque varii il carico in ampère della macchina. Talvolta anzi, quando si vuol compensare con un maggior voltaggio la perdita di linea o del circuito esterno, queste dinamo si fanno *ipercompound* ossia con un maggior numero di spire nel circuito in serie del campo, tanto da compensare, non solo l'effetto di smagnetizzazione della reazione d'armatura, ma di provocare un aumento di tensione col crescere della intensità nel circuito esterno.

144. Perdite di energia nelle dinamo. Rendimento. — In tutte le macchine elettriche, come dinamo, alternatori, trasformatori, motori, ecc., che compiono una trasformazione di energia, bisogna distinguere la *potenza assorbita* o primaria, dalla *potenza resa* o secondaria. L'energia resa che è quella utilizzata è sempre minore della energia assorbita perchè una parte viene dissipata in lavori, riscaldamenti internamente alla macchina.

L'energia o potenza dissipata costituisce ciò che si dice *le perdite* interne.

Le perdite di una dinamo sono rappresentate:

1.° dalle *perdite meccaniche* formate dall'attrito, dei perni nei cuscinetti, dallo sfregamento delle spazzole sul collettore, dalla ventilazione.

2.° dalle *perdite magnetiche per isteresi e correnti di Foucault*. Le perdite di isteresi derivano dal lavoro molecolare del ferro costituente il nucleo dell'indotto delle dinamo il quale ad ogni giro si inverte di polarità. (Vedi paragrafo 63). Tali perdite sono proporzionali all'induzione B nel ferro ed al numero dei cicli ossia dei giri; esse si risolvono in riscaldamento.

Le correnti di Foucault si formano in tutti i pezzi delle dinamo quando siano sottoposti ad una variazione di flusso magnetico. Quantunque il nucleo degli indotti sia lamellare pure piccolissime correnti si formano ancora nelle lamine. Altre correnti di Foucault si formano nei bulloni, nell'albero, nei conduttori stessi di avvolgimento quando sono grossi. Correnti di Foucault si formano infine sulla superficie interna delle espansioni polari, create dalla variazione di flusso magnetico dei denti dell'indotto. (Fig. 270).

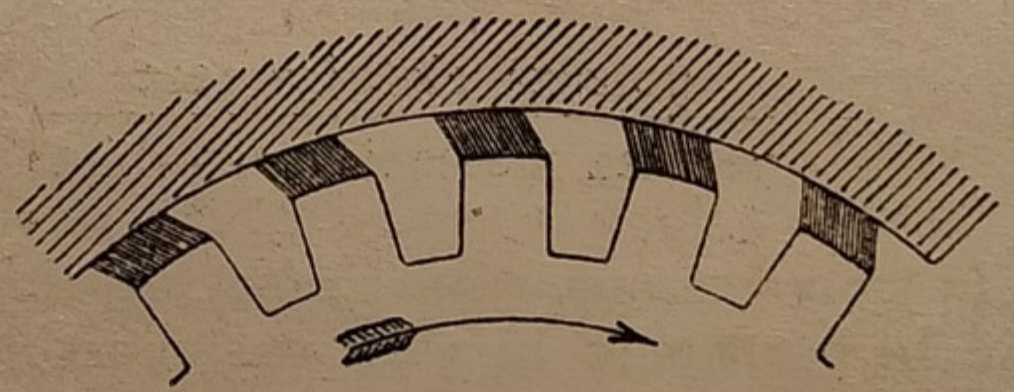


Fig. 270. - Pennelli magnetici sui denti degli indotti.

Questi denti emanano tanti pennelli di flusso magnetico per cui la superficie polare viene ad essere sottoposta ad una variazione di magnetismo che dà luogo a tante correnti dirette perpendicolarmente al flusso magnetico ed al movimento. Nel caso della figura esse sarebbero dirette perpendicolarmente al piano del disegno.

3.° dalle *perdite elettriche*. Queste perdite sono dovute all'effetto Joule nei conduttori di avvolgimento dell'indotto e dell'induttore e sono espresse *per ciascuno* di questi circuiti dalla formola:

$$W = R\,I^2$$

dove W sono i watt perduti, R la resistenza del circuito indotto od induttore, I le rispettive intensità.

Si dice *rendimento elettrico* μ_e il rapporto fra la potenza prodotta ai morsetti I × V e l'energia generata I × E, dove V è la tensione ai morsetti, I l'intensità; E la f. e. m. generata dall'indotto. Se r_a è la resistenza dell'armatura; r_i è la resistenza dell'induttore; i la corrente d'eccitazione per la dinamo in derivazione si ha:

Dinamo in derivazione:

$$\mu_e = \frac{I\,V}{I\,V + r_a\,I^2 + r_i\,i^2}$$

Dinamo in serie:

$$\mu_e = \frac{I\,V}{I\,V + (r_a + r_i)\,I^2}$$

Nella pratica ha molta importanza il *rendimento totale* o industriale espresso:

$$\mu = \frac{\text{potenza elettrica resa}}{\text{potenza meccanica assorbita}}$$

Siccome la potenza meccanica assorbita è uguale alla potenza resa più le perdite P in watt così possiamo scrivere:

$$\mu = \frac{I\,V}{I\,V + P}$$

Nelle perdite P sono comprese quelle meccaniche, magnetiche ed elettriche.

Le perdite sono espresse in watt.

Tutte le perdite indicate, e che sono inevitabili, si risolvono in un riscaldamento della macchina; onde la potenza di una determinata dinamo è limitata dalla temperatura che raggiunge l'indotto e l'induttore ed oltre la quale resterebbe compromessa la composizione, la tenacità e la vita degli isolamenti tessili e cartacei che isolano i fili d'avvolgimenti. Tale limite di temperatura è ritenuto di 85° centigradi.

145. Accoppiamento delle dinamo in parallelo. — Si premette che le dinamo più usate negli impianti industriali sono quelle ad eccitazione in derivazione o compound, con o senza poli ausiliari. Nelle officine elettriche si fa l'installazione di più macchine e a seconda della richiesta di corrente, *le dinamo vengono accoppiate in parallelo* come si fa per le pile e gli accumulatori. Non si esclude la possibilità di poter accoppiare le dinamo anche in serie fra loro, quando si voglia aumentare la tensione, ma il caso è estremamente raro nella pratica.

Ordinariamente *gli impianti elettrici funzionano a tensione costante* cioè le dinamo generatrici e gli apparecchi utilizzatori della corrente (lampade, motori, tram) impiegano una tensione costante. In questi impianti ciò che varia è la intensità della corrente la quale è più o meno grande a seconda che nella rete esterna o di distribuzione della energia si aumenta o si diminuisce il numero delle lampade o di motori alimentati.

Le tensioni normalmente impiegate sono: 100-120-150-200-300 volt per impianti di luce elettrica e 500-600-1200-2400 volt per impianti di tram elettrici; 5-10 volt per elettrolisi, nichelatura, argentatura, ecc. Ogni dinamo viene azionata separatamente da un *motore primario* che può essere una turbina, una macchina a vapore o un motore elettrico trifase.

Fare l'accoppiamento in parallelo delle dinamo significa *metterle in derivazione* sopra due conduttori principali che ordinariamente sono molto grossi e di sezione rettangolare; questi conduttori si chiamano *sbarre* o anche sbarre omnibus perchè raccolgono e sommano le correnti generate dalle dinamo in un'unica corrente. Alle sbarre si attaccano le linee esterne o *feeder* o alimentatori che vanno a portare e distribuire la corrente agli apparecchi utilizzatori: lampade, motori, vetture tramviarie, ecc.

Ogni dinamo viene provvista di *un interruttore bipolare* oppure di due interruttori unipolari uno sul polo + e uno sul polo —; inoltre si inseriscono su ciascuna dinamo un amperometro ed un voltmetro. Man mano che la richiesta di corrente aumenta si innestano sulle sbarre una, due, tre di-

namo, ecc. e si disinnestano quando il bisogno diminuisce. L'innesto ed il disinnesto si fa cogli interruttori.

La condizione essenziale perchè si possa *fare il parallelo* ossia innestare una dinamo in derivazione sulle sbarre è che all'istante dell'accoppiamento ossia della chiusura dell'interruttore la polarità e la sua tensione siano perfettamente uguali alla polarità e alla tensione delle sbarre.

L'operazione e la disposizione dei fili per l'accoppiamento in parallelo si fa secondo lo schema della fig. 271.

In questa figura sono rappresentate due dinamo D_1 e D_2 le quali devono essere accoppiate in parallelo sopra le due sbarre. Con I_1 e I_2 sono indicati gli interruttori della corrente. Con

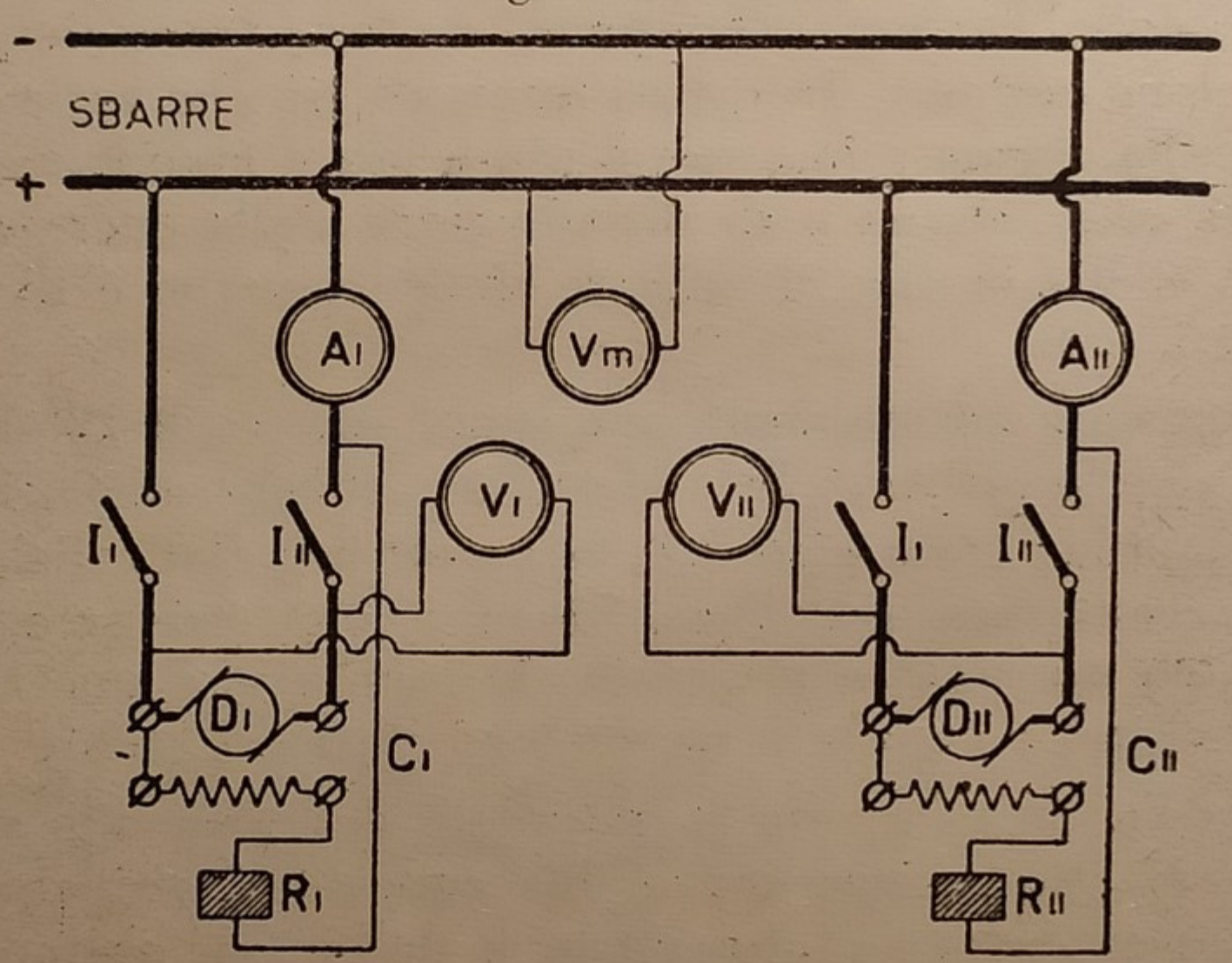


Fig. 271. - Schema semplice di accoppiamento di due dinamo in parallelo fra loro

A_1 e A_2 gli amperometri; con V_1 e V_2 i voltmetri; con R_1 e R_2 i regolatori di campo delle dinamo per regolare la tensione. Supponiamo che la dinamo D_1 sia già in funzione e che si debba innestare la dinamo D_2. Si mette in movimento quest'ultima macchina e si chiude l'interruttore I_1 di sinistra; allora la corrente delle sbarre passa dal polo + al circuito del campo magnetico, al regolatore R_2 e per il conduttore C_2 ritorna al polo negativo. La corrente non può passare per la dinamo D_2 perchè l'interruttore I_2 è aperto. Allora si regola

col regolatore R_2 l'eccitazione della dinamo in modo che la tensione segnata V_2 sia uguale a quello di V_1. Quando le due tensioni sono perfettamente uguali si chiude l'interruttore I_2 di destra e così la dinamo D resta accoppiata in parallelo colla D_1. Quando le due dinamo sono accoppiate si regola la intensità della corrente mediante i regolatori R_1 e R_2 dando più o meno acqua alla turbina o vapore al motore.

L'operazione per riconoscere se la polarità della dinamo D_2 coincide con quella delle sbarre si fa una volta tanto allorchè si fa l'installazione e si adopera per la prima volta la dinamo D_2. Colla disposizione della fig. 271 la polarità non può più cambiare per nessun motivo, se non scambiando gli attacchi dei fili.

Per disinnestare una dinamo in parallelo con altre si manovra il reostato di campo e si toglie acqua alla turbina o vapore alla macchina motrice finchè l'amperometro segna zero ampère; allora si aprono gli interruttori e si ferma la macchina.

01

CAPITOLO VIII.

Alternatori.

146. Parti principali di un alternatore. — Abbiamo visto al paragrafo 121 il principio fondamentale sul quale si fonda la costruzione delle dinamo e degli alternatori e perciò senza fermarci a ripetere lo stesso argomento passiamo a descrivere un alternatore moderno industriale.

La costruzione degli alternatori fu oggetto nei primi tempi in cui si diffuse la corrente alternata di centinaia di brevetti relativi a forme svariatissime di indotti e induttori. Tutte queste forme andarono eliminandosi finchè si giunse al tipo

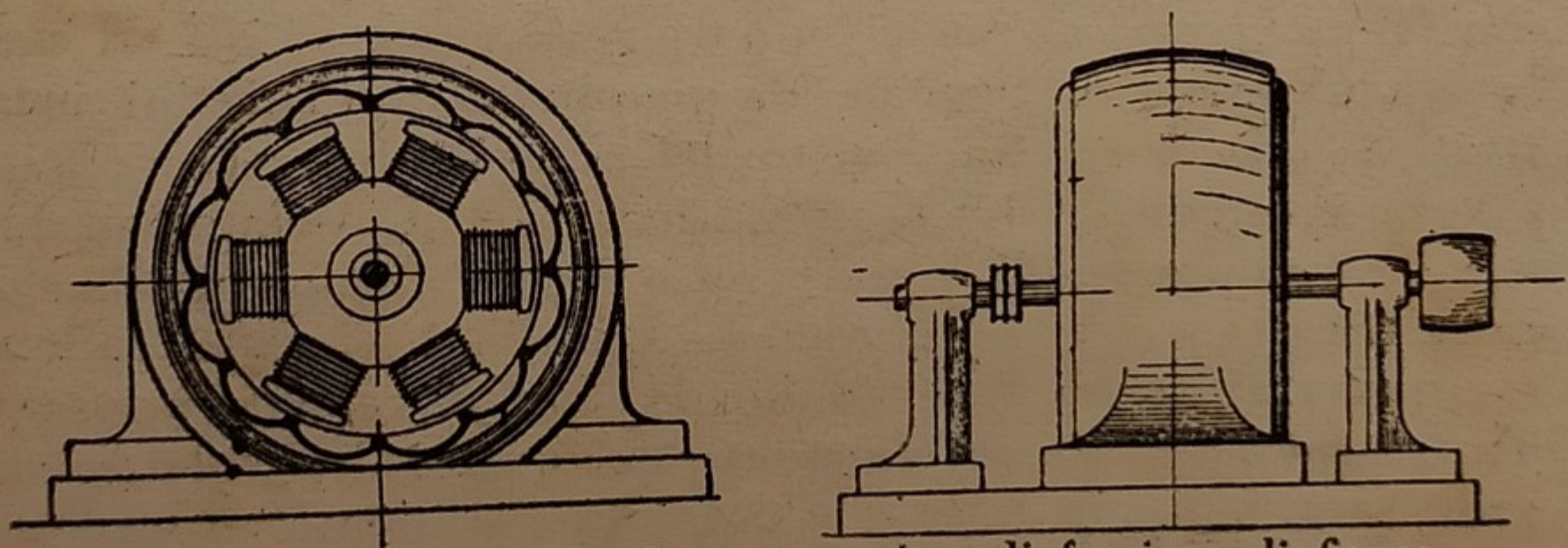


Fig. 272. - Schema di alternatore visto di faccia e di fianco.

moderno, unico per tutti i costruttori di alternatori. Riferendoci alla fig. 272 esso è composto: 1.° di un *campo induttore multipolare a polarità alternate* N e S; 2.° di un *indotto* formato da un nucleo di ferro lamellare portante degli avvolgimenti.

Generalmente l'induttore è girante e l'indotto fisso; in tal caso l'induttore è formato da un albero d'acciaio su due supporti portante una *stella di elettromagneti*. Si dice anche *ruota dei poli*. L'indotto consta di un anello di ferro lamellare esterno all'induttore, tenuto in posizione verticale da un sostegno o lanterna di ghisa che fa corpo col basamento della macchina. Gli avvolgimenti del circuito indotto sono allogati, sotto forma di matasse, in scanalature aperte secondo le generatrici della superficie interna dell'anello.

Dettagli di costruzione. — I nuclei degli elettromagneti sono generalmente di acciaio fuso e sono riportati sopra un mozzo d'acciaio (raramente di ghisa) calettato sull'albero girevole e con incastri a coda di rondine e biette. (Fig. 273).

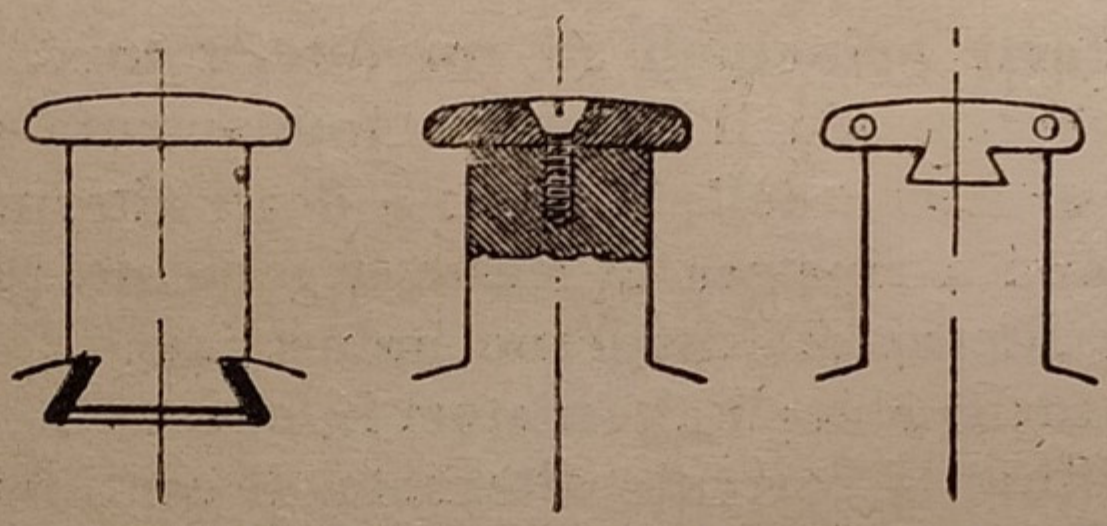


Fig. 273. - Tipi diversi di poli per alternatori.

Gli elettromagneti hanno di solito delle *espansioni polari* che fanno corpo coi nuclei oppure sono riportati. In tal caso le espansioni sono formate da pacchetti di lamierini incastrati a coda di rondine nei nuclei massicci. Sopra i nuclei è avvolto il circuito induttore sotto forma di filo isolato con due o tre coperture tessili oppure sotto forma di una piattina di rame piegata a spirale di costa. Le spirali sono isolate fra loro e rispetto ai nuclei di ferro con isolanti di cartone pressato. Tutti i rocchetti di avvolgimento dei nuclei degli elettromagneti sono messi in serie e la corrente continua è comunicata alla ruota dei poli con due anelli di bronzo o di ferro.

Le caratteristiche che distinguono gli alternatori dalle dinamo sono: la presenza della ruota di poli, di due anelli e la mancanza del collettore.

L'anello dell'indotto è formato da tanti dischi di lamierino di ferro dolce dello spessore di mm. 0,3 a 0,5 impaccati e stretti da bulloni. I lamierini sono separati da fogli di carta

forte e sottile. Nella maggior parte degli alternatori il nucleo lamellare è suddiviso in tanti anelli paralleli distanti 10-15 mm. per creare degli interstizi nella massa di ferro e facilitare la ventilazione dall'interno all'esterno ed il raffreddamento del ferro e degli avvolgimenti. Questo raffreddamento è necessario perchè l'anello di ferro si scalda per istercsi e correnti di Foucault e gli avvolgimenti per l'effetto Joule. Anzi per raffreddare più rapidamente le masse di ferro e gli avvolgimenti, all'induttore ruotante o *rotore*, si adattano delle palette di ferro e ventole a guisa delle pale dei ventilatori.

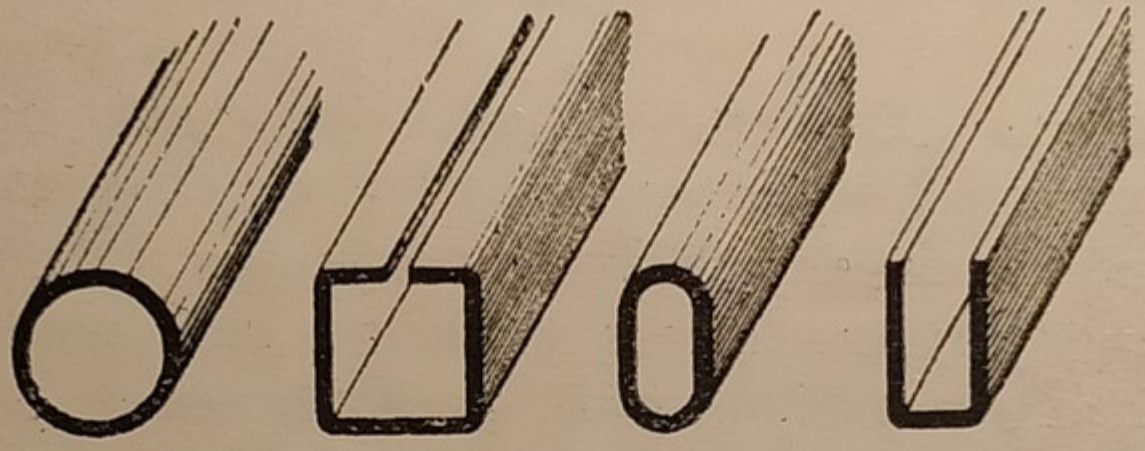


Fig. 274. - Tubi e canali isolanti per le scanalature.

Il circuito indotto è formato da matasse di filo o da sbarrette di rame. La copertura isolante dei fili è *tessile*, cioè formata soltanto da una fasciatura di fili di cotone o lino avvolti sul rame in più strati e da treccie a calza. La copertura delle sbarrette è fatta con nastro comune ed a mano. I

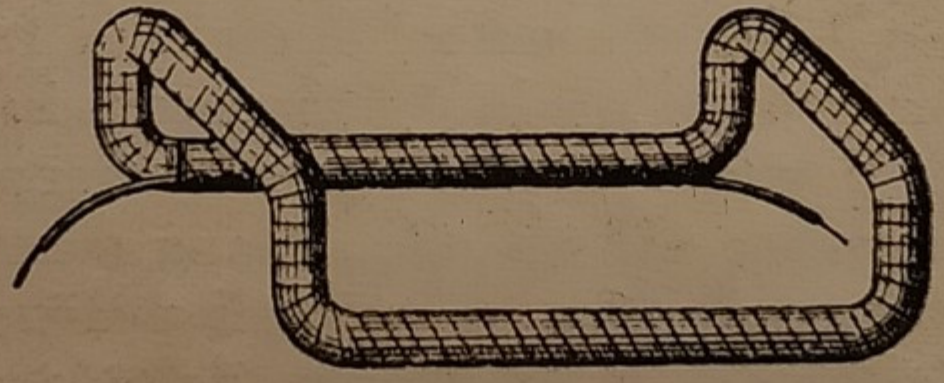


Fig. 275. - Matassa di filo per alternatore.

lati delle matasse o delle sbarre che vanno allogati nelle scanalature vengono poi fortemente isolati dal ferro con tubi o canali di cartone pressato o di micanite. (Fig. 274-275).

A seconda della forma delle scanalatura nel nucleo dell'indotto le matasse si costruiscono in due modi: 1.° Se le scanalature sono chiuse o semichiuse le matasse si creano passando e ripassando il filo nelle scanalature dell'indotto

e facendo i risvolti esterni a mano o con sagoma di legno. 2.° Se le scanalature sono aperte o rettangolari le matasse ed i risvolti delle matasse vengono *nastrati* (avvolti con nastro), verniciate con vernici isolanti di gomma lacca e alcool puro oppure con vernici sterling e di copale. Taluni costruttori usano di impregnare le matasse immergendole in bagni caldi di vernice o masse isolanti.

Tutte queste verniciature ed impregnamenti si fanno sopratutto per lo scopo di impedire che il rame venga attaccato dai gaz corrosivi misti all'aria e sopratutto dall'*ozono*, potente ossidante, che si forma inevitabilmente intorno ai fili sotto alte tensioni.

Per eccitare gli elettromagneti induttori, occorre della corrente continua. Perciò ogni alternatore deve essere munito di una *eccitatrice* che è una dinamo comune. Le eccitatrici degli alternatori possono essere *separate* cioè mosse separatamente dagli alternatori, oppure possono essere *coassiali* cioè montate sullo stesso albero girevole dell'alternatore ad una estremità sporgente dal supporto.

Le eccitatrici danno la corrente all'induttore attraverso dei reostati coi quali si regola il campo magnetico e quindi la tensione della corrente alternata dell'indotto.

147. Relazione fra il numero dei giri degli alternatori, il numero dei poli e la frequenza della corrente. — Nella costruzione degli alternatori comuni si fa in modo che ad ogni polo corrisponde un lato di matassa indotta. Davanti ad ogni matassa devono passare successivamente un polo N e un polo S per creare un periodo di una corrente alternata. Se quindi un alternatore ha un paio di poli soltanto e fa n giri al *minuto secondo*, la frequenza della corrente indotta sarà n. Se vi sono due paia di poli la frequenza sarà $2n$; se vi sono p *paia* di poli la frequenza f sarà:

$$f = p \times n$$

Se, come di solito, si esprime il numero dei giri di una macchina riferendolo al *minuto primo*, e se con p indichiamo *non le paia di poli ma il numero totale dei poli* avremo:

$$f = \frac{p \times n}{2 \times 60} = \frac{p \times n}{120}$$

Da questa formola si cavano poi le seguenti:

$$p = \frac{120 \times f}{n} \qquad n = \frac{120 \times f}{p}$$

ESEMPI. — 1.° Qual'è la frequenza della corrente di un alternatore che ha 3 paia di poli (6 poli) e fa 840 giri al 1'?

R. La frequenza sarà data dalla relazione.

$$f = \frac{840 \times 6}{120} = 42$$

2.° Un alternatore fa 504 giri e dà una frequenza 42. Quanti poli ha l'induttore?

R. Il numero dei poli sarà dato dalla seconda formola:

$$p = \frac{120 \times f}{n} = \frac{120 \times 42}{504} = 10$$

3.° Quanti giri devesi dare ad un alternatore a 6 poli per produrre della corrente alternata a 50 periodi?

R. Il numero dei giri sarà dato dalla terza formola, mettendo al posto dei poli il numero 6.

$$n = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ giri}$$

TABELLA N. 16 - Giri e numero dei poli degli alternatori per frequenze normali di 42 e 50 periodi.

N. dei poli	Giri al minuto primo per la frequenza	
	50	42
2	3000	2520
4	1500	1260
6	1000	840
8	750	630
10	600	504
12	500	420
16	375	315
20	300	252
24	250	210

148. Avvolgimenti delle macchine a corrente alternata. (1) — Gli avvolgimenti per indotti a corrente alternata si fanno a *matasse* di filo od a *sbarre*.

L'adozione di un sistema piuttosto che dell'altro dipende non solo dalla tensione e quindi dal numero delle spire da avvolgere ma anche da criteri di economia e di facilità di costruzione dell'avvolgimento.

La sede della f. e. m. negli avvolgimenti è nei tratti dei conduttori allogati nelle scanalature.

Scopo dello studio degli avvolgimenti è il modo di collegare in serie od in parallelo i conduttori e le matasse in modo da sommare le loro f. e. m. indotte oppure le loro intensità.

Immaginiamo di svolgere in un piano la superficie cilindrica di un alternatore, come è indicato nella fig. 276 e di segnare i conduttori nelle scanalature in una posizione istantanea dei poli induttori.

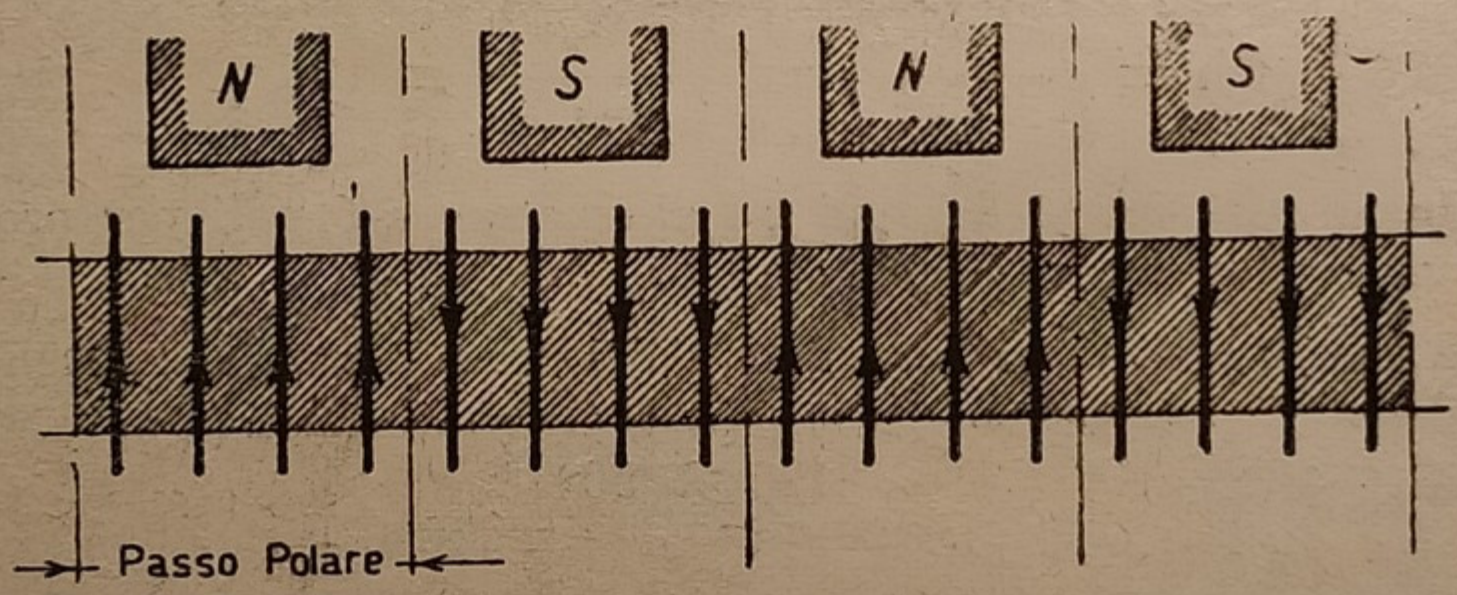


Fig. 276 - Direzione della corrente nei gruppi di conduttori sotto ai poli.

Avremo che i conduttori sotto ai poli N saranno percorsi da correnti indotte contrarie a quelle dei conduttori sotto ai poli S. Ogni lato di matassa dovrà perciò trovarsi uno sotto l'influenza di un polo N e uno sotto al polo S cioè *il passo dei lati di matassa* deve essere uguale al *passo polare*.

Per fare un avvolgimento monofase si divide la superficie dell'anello in tante parti quanti sono i poli ed a ciascuna

---

(1) Anche per la trattazione di questo paragrafo ci siamo serviti, come per quello relativo agli avvolgimenti delle dinamo, del testo classico « Costruzione delle Macchine Elettriche » dell'ing. Rebora dove vi è una trattazione diffusa degli avvolgimenti.

scanalatura si segnano le freccie come alla figura 276. Indi si attua l'avvolgimento in uno dei modi che seguono.

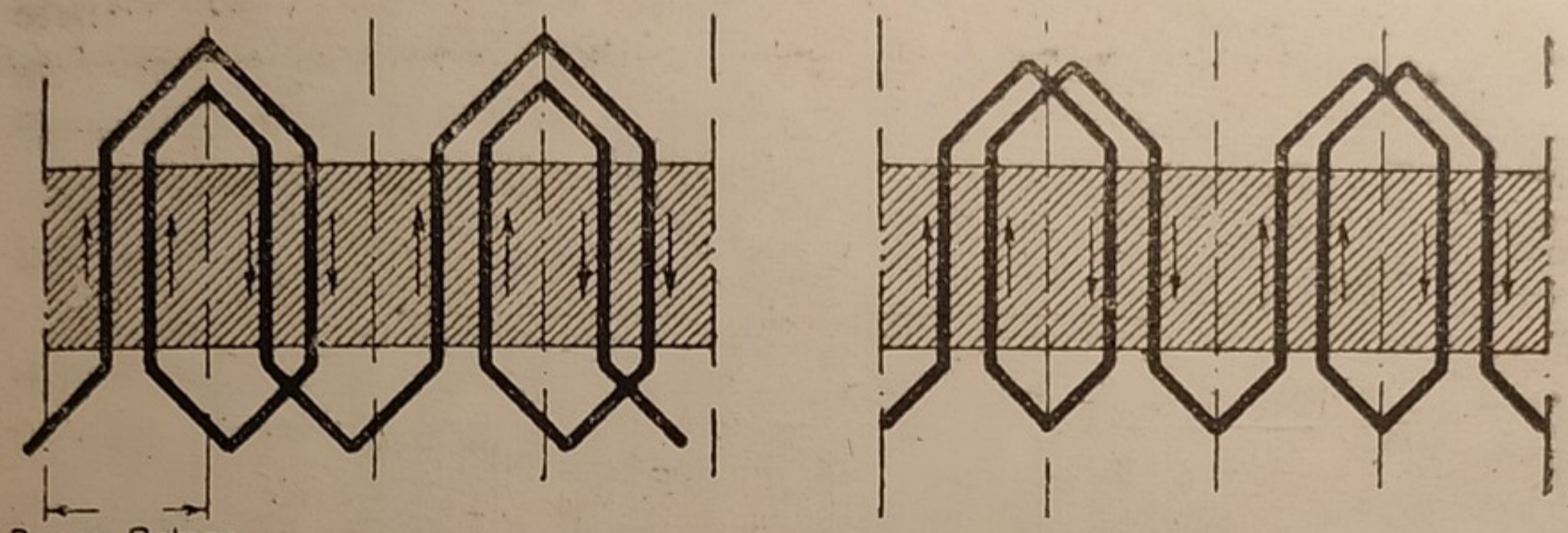


Fig. 277 - Avvolgimenti a spirali semplici ed imbricati.

Avvolgimenti a sbarre. — Negli avvolgimenti fatti con sbarrette di rame a sezione generalmente rettangolare si mette una sbarretta per ogni scanalatura e le connessioni dall'una all'altra si fanno a forma di *spirali semplici*, di *spirali imbricate* e più di frequente a *zig-zag* ondulato. (Fig. 277-278).

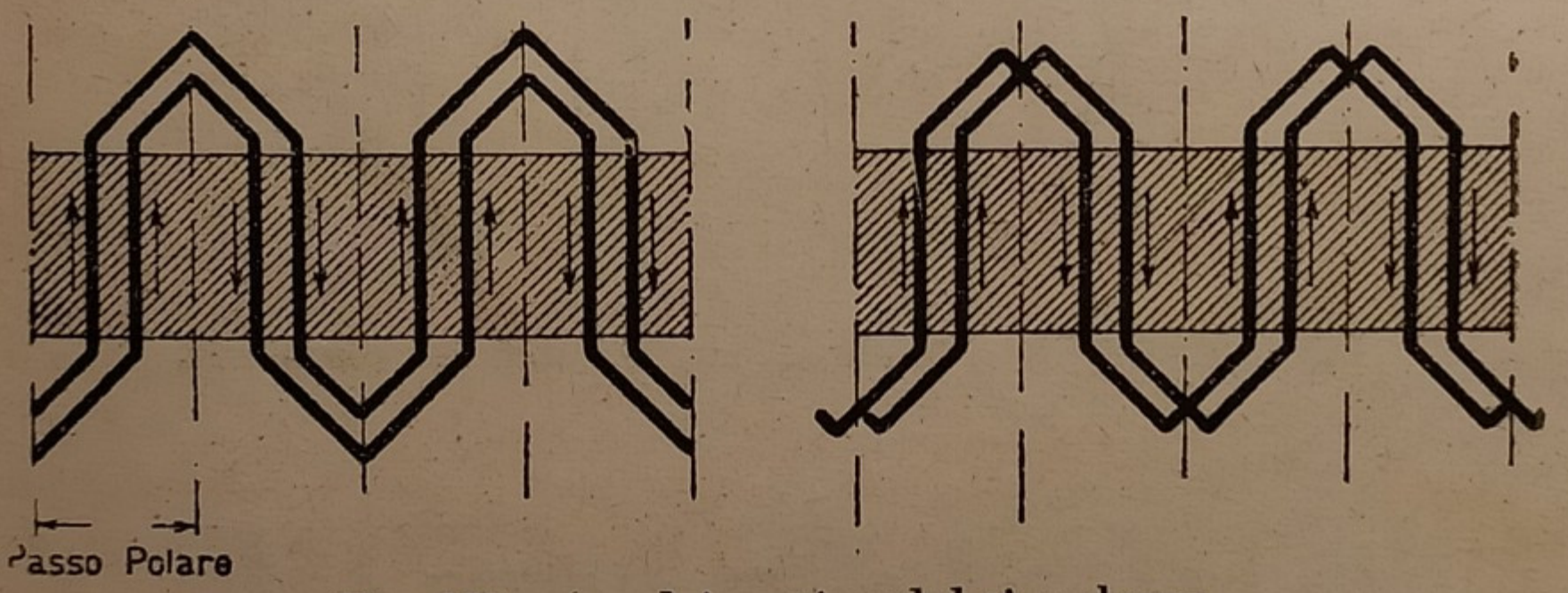


Fig. 278 - Avvolgimenti ondulati a sbarre.

Avvolgimenti a matasse. — Gli avvolgimenti a matasse di filo sono ora a *matasse semplici* cioè con una sola matassa per polo o paio di poli: ora a *gruppi in serie di due, tre, quattro matasse.* Le matasse che compongono il gruppo sono poi disposte concentriche una dall'altra oppure imbricate, come si vedrà più avanti.

Sia che le matasse dell'avvolgimento siano semplici o siano disposte a gruppi, esse si costruiscono in due tipi ben

distinti: 1.° Tipo di avvolgimento a *matasse grandi o larghe*; 2.° Tipo di avvolgimento a *matasse piccole o corte*.

Le matasse grandi occupano coi loro lati due poli; le *matasse piccole occupano appena un polo* cioè non sono più larghe di un *passo polare*. Le due figg. 279 e 280 dànno la rappresentazione di due gruppi di 3 matasse tipo grande o bipolare disposte fra loro a spirale semplice ed imbricate.

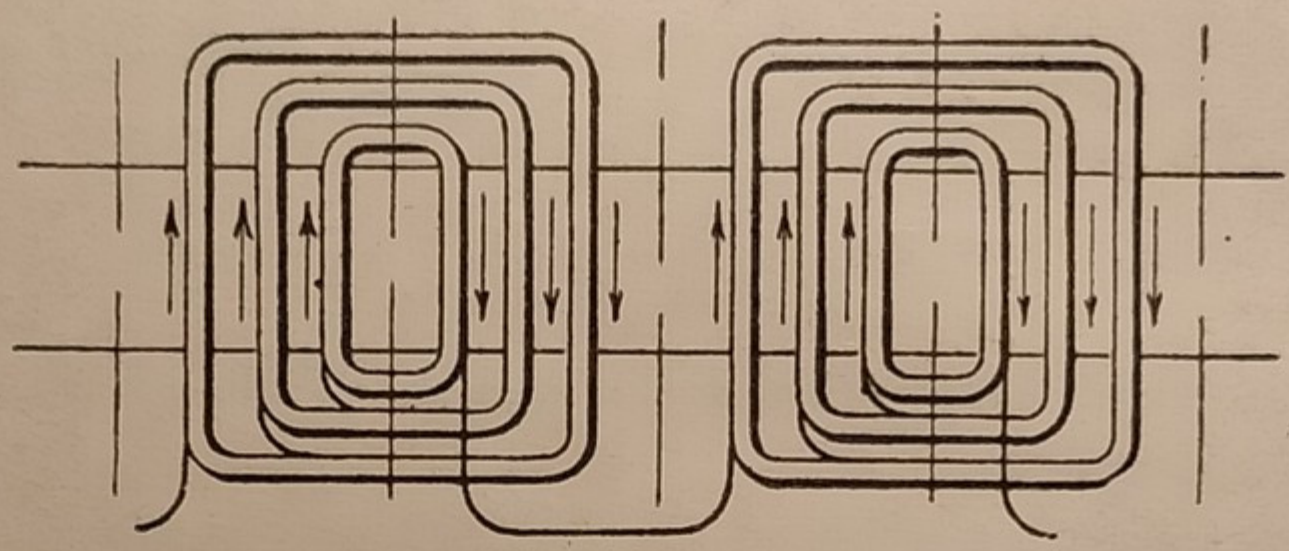


Fig. 279 - Gruppi di matasse grandi e spirale (bipolari).

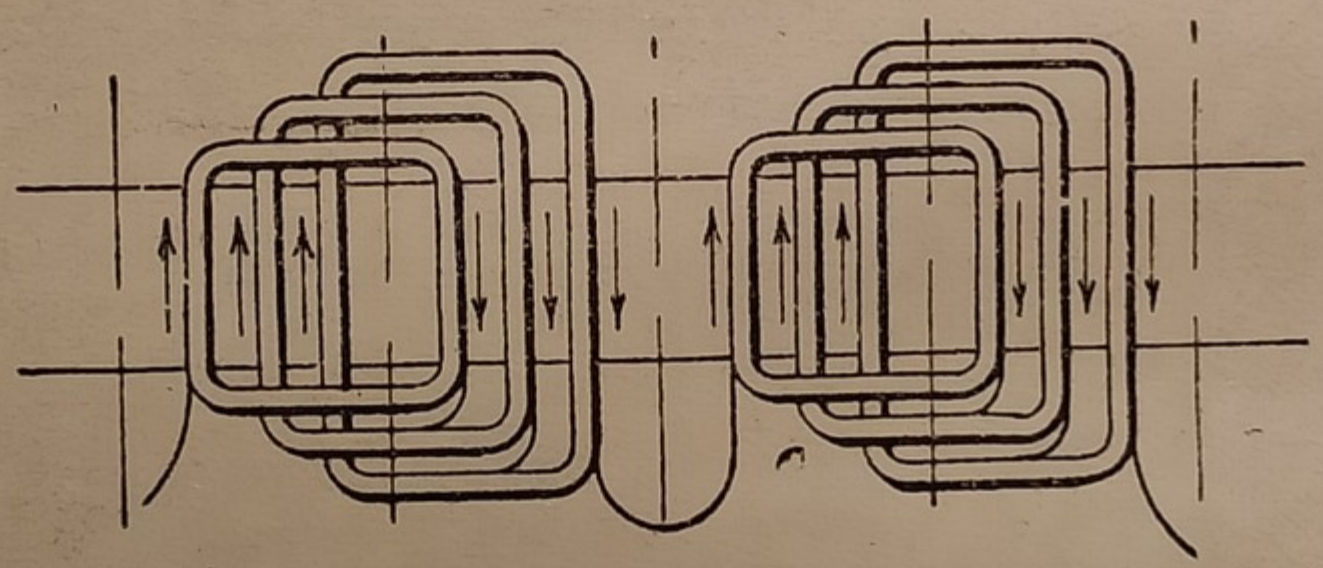


Fig. 280 - Gruppi di matasse grandi imbricate (bipolari).

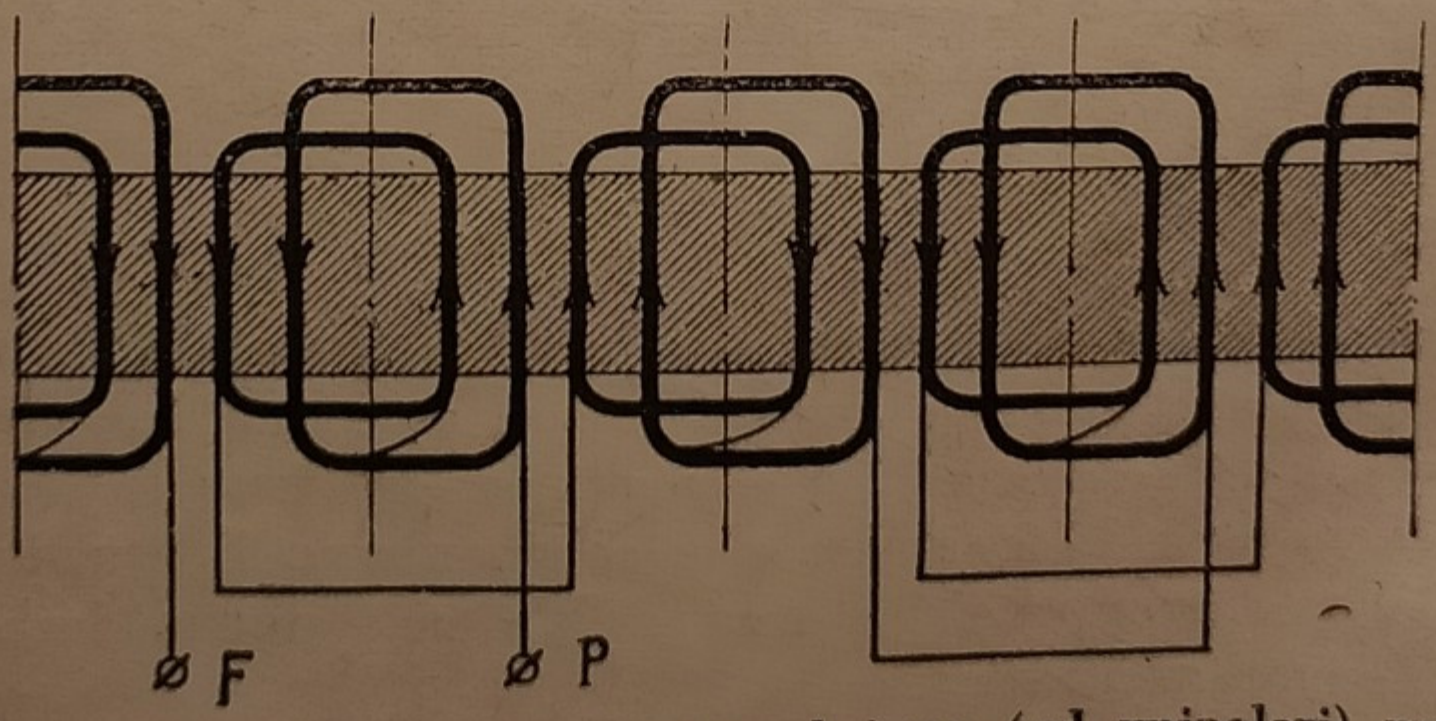


Fig. 281 - Gruppi di matasse corte imbricate (od unipolari) monofasi.

Le figg. 281, 282, 283 dànno la rappresentazione di avvolgimenti a matasse corte od unipolari sia a gruppi di due (a spirale e imbricate) sia a matassa semplici imbricate.

Dai disegni si vede che il senso della circolazione della corrente in ogni istante è *simmetrico* in tutte le matasse grandi e *alternativamente contrario* nelle matasse piccole.

Negli avvolgimenti a matasse grandi vi sono tante matasse o gruppi di matasse quante sono le paia di poli.

Negli avvolgimenti a matasse corte vi sono tante matasse o gruppi di matasse quanti sono i poli.

Avvolgimenti ondulati a sbarre. — Questi avvolgimenti sono fatti con sbarrette di rame incassate una ad una oppure a due a due nelle scanalature. Vi sono due tipi caratteristici.

1.° *Tipo normale.* — Seguendo la corrente essa passa da

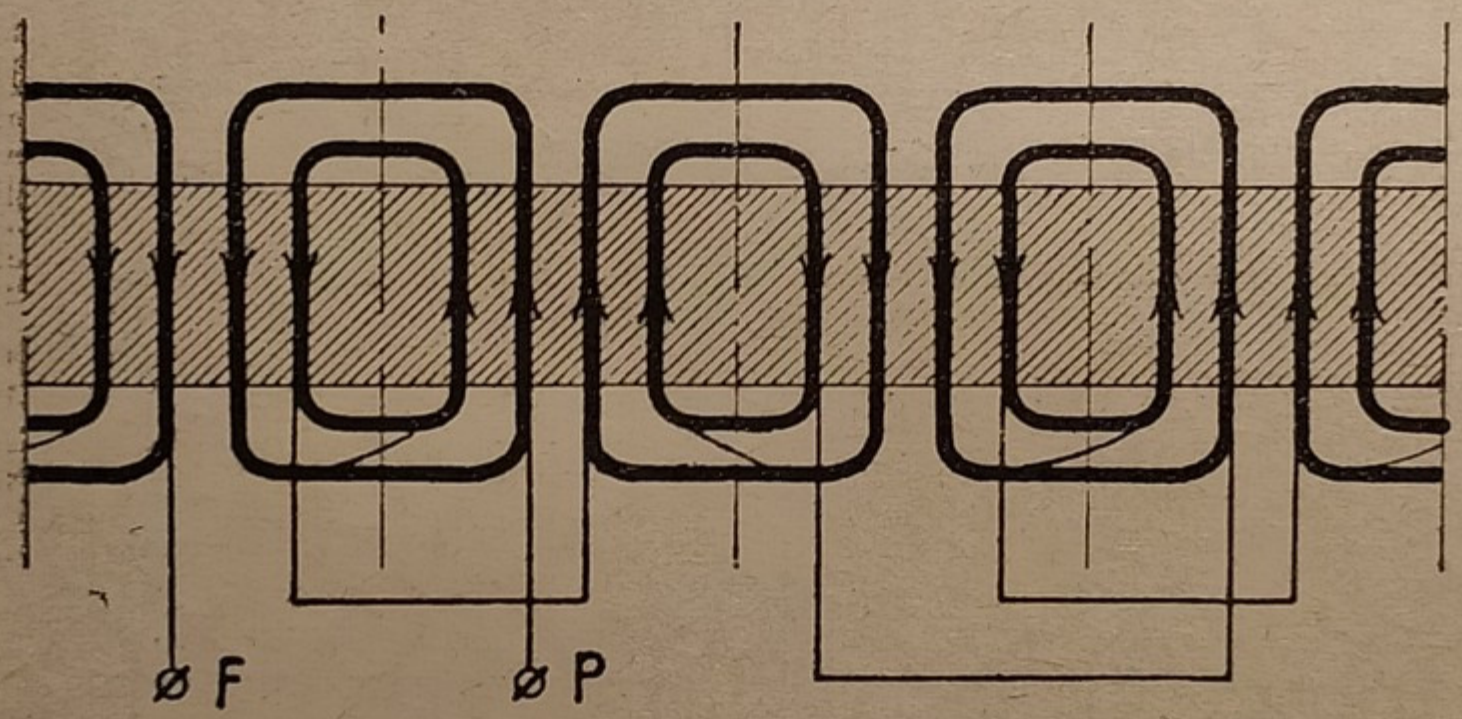


Fig. 282. - Gruppi di matasse corte a spirale concentriche monofasi.

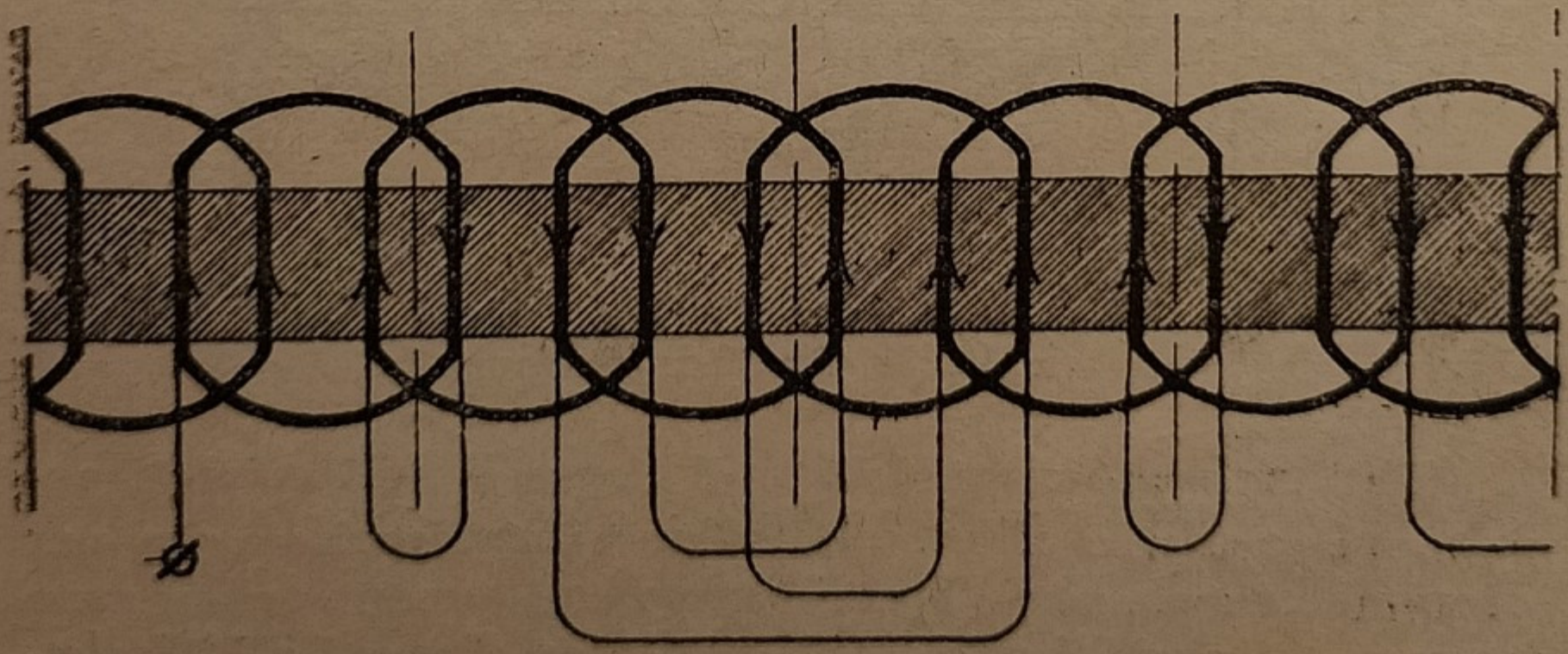


Fig. 283 - Matasse semplici imbricate monofasi.

una sbarretta sotto ad un polo ad un'altra sotto il polo successivo, poi ad una terza sotto il 3.° polo ecc. e così la corrente compie tanti giri quanti sono i conduttori sotto un polo come negli avvolgimenti ondulati per dinamo. (Figg. 277 - 278).

2.° *Tipo ondulato a regressione.* — Seguendo la corrente essa passa da una sbarretta sotto un polo alla corrispondente sotto il polo successivo; poi alla terza sbarretta sotto il 3.° polo successivo, ecc., e così fino ad esaurire metà dei conduttori da collegare; poi la corrente segue le sbarre in senso opposto collegando i rimanenti conduttori. (Fig. 284).

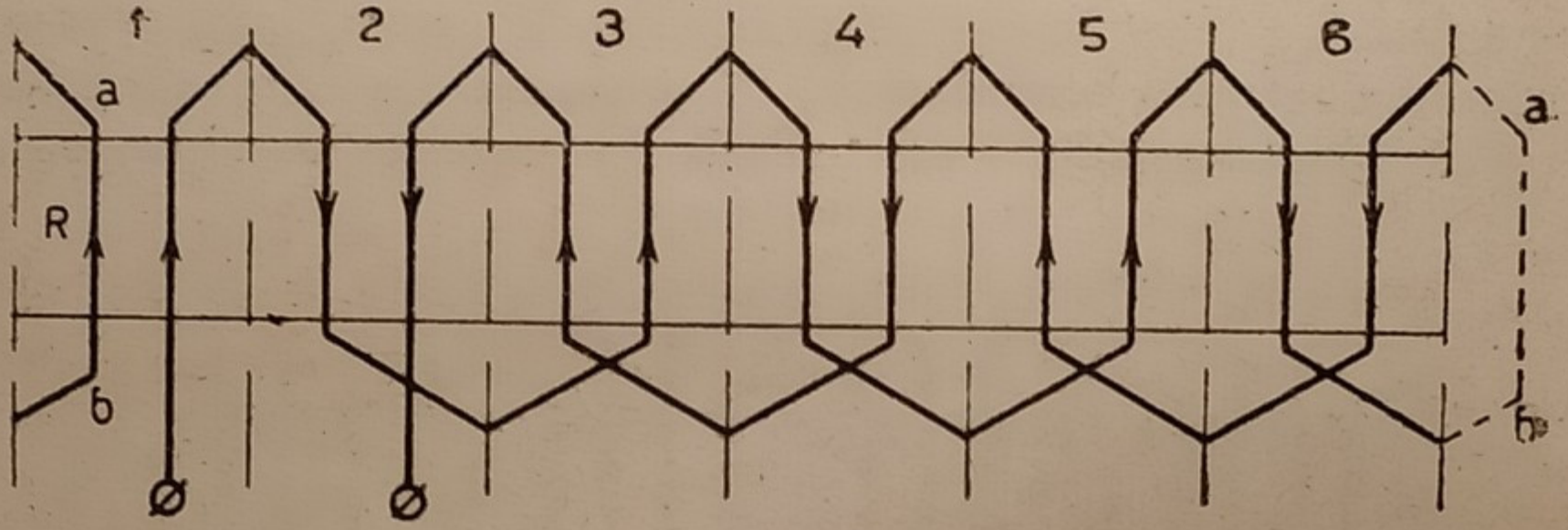


Fig. 284 - Avvolgimenti ondulati monofasi.
(a semplice e doppia regressione).

149. Avvolgimenti trifasi. — I diversi tipi di avvolgimento fin qui descritti si riferiscono ad un unico circuito e cioè per corrente alternata monofase. Per produrre correnti trifasi sono necessari tre circuiti monofasi uguali, ma disposti a 120° elettrici fra loro. I conduttori che si trovano in un passo polare

risultano sempre divisi in tre gruppi essendo ogni gruppo appartenente ad una delle tre fasi. (Fig. 285). Ne risulta che il numero dei conduttori o dei canali sotto un polo deve essere multiplo di 3 ossia divisibile per 3. Di solito ad ogni passo polare (ossia ad ogni polo) corrispondono da due a quattro canali per fase. Il numero complessivo dei canali o dei conduttori di un indotto trifase è sempre multiplo di $3 \times p$ dove p è il numero dei poli.

Per formare un avvolgimento trifase: 1.° si divide la periferia in tante parti uguali quanti sono i poli. 2.° Per ciascuna parte si dividono i canali in tre gruppi corrispondenti alle tre fasi. 3.° Si collegano i conduttori di una fase sotto un polo con quelli della stessa fase sotto gli altri poli successivi, eseguendo uno qualunque degli avvolgimenti monofasi indicati nel precedente paragrafo. 4.° Si ripete lo stesso avvolgimento per le altre due fasi; si fissano i capi di principio e di fine di ciascuna fase e si collegano a triangolo od a stella.

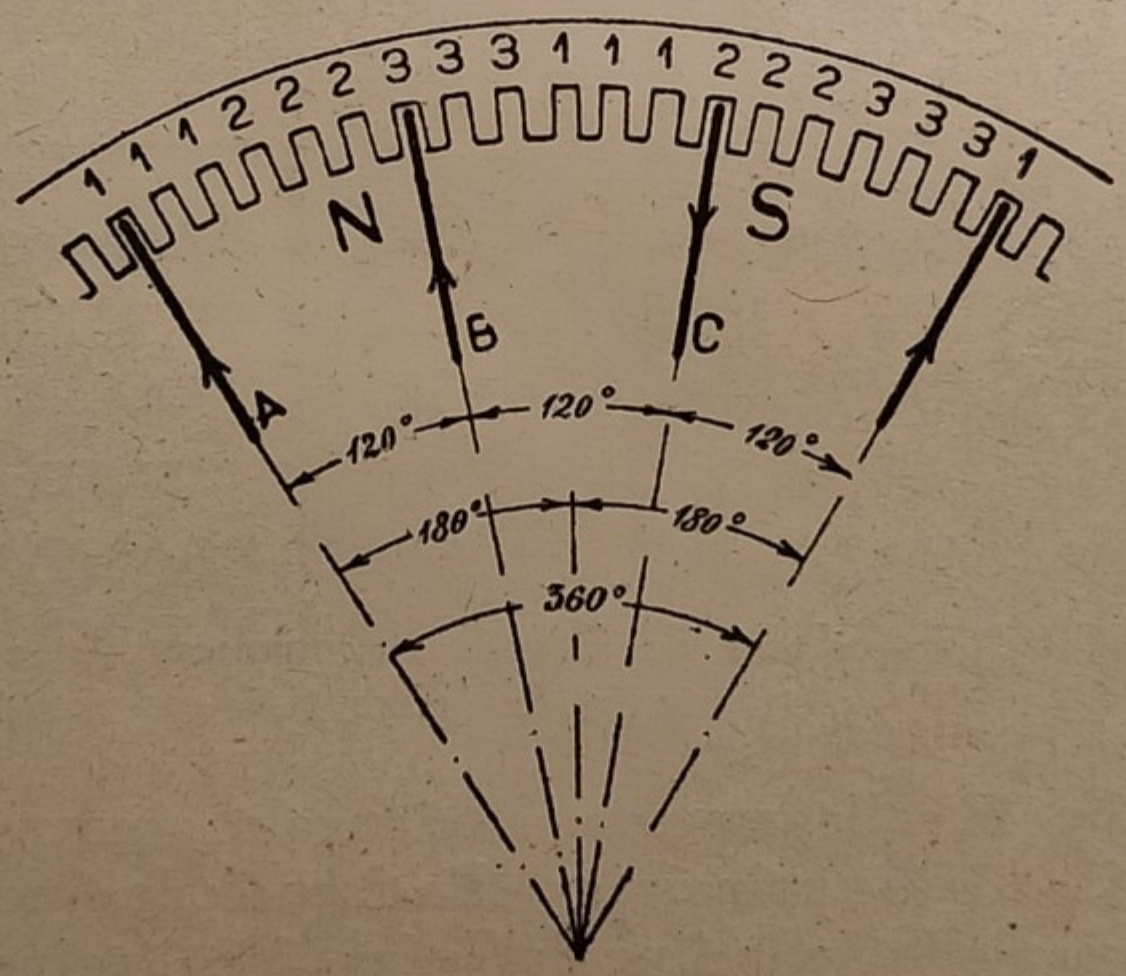


Fig. 285 - Come si devono fissare i capi delle tre fasi.

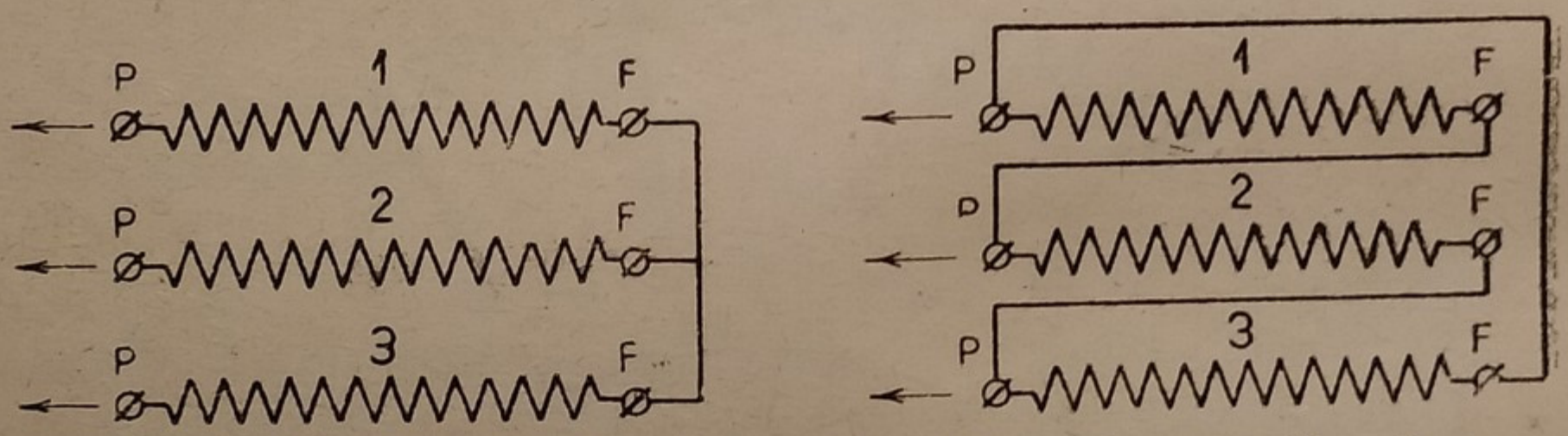
Per determinare i capi delle tre fasi di principio (o di fine), bisogna far attenzione che essi devono trovarsi 120.° elettrici fra loro.

Per spiegare cosa sia l'angolo elettrico, ricordiamo che l'angolo fra le mezzarie di due poli successivi corrisponde a 180° e quindi quello fra tre poli successivi N-S-N a 360°. Nella

fig. 285 è rappresentato il settore di un indotto corrispondente appunto a 360° elettrici abbracciante due poli, con 3 canali per polo e per fase.

Le tre frecce ABC indicano come dovrebbero presentarsi le estremità delle tre fasi (di principio o di fine) ove si volessero tenere contigue; ma non è una condizione necessaria la contiguità delle estremità delle tre fasi; la estremità della fase 2 può trovarsi in altri settori d'avvolgimento purchè sotto al polo omonimo; cioè il principio della fase 2 può trovarsi a 360° elettrici dalla posizione C oppure a 2 × 360 ecc. Così pure dicasi dell'estremità della fase 3 ossia di B.

Una volta fissati i 3 principi e le 3 fine di ciascuna fase si fa l'unione a stella od a triangolo. Per fare il collegamento a stella si uniscono insieme le tre fine con un conduttore, mentre ai tre principi si attaccano i tre fili del circuito esterno; ma si può fare anche il contrario, cioè, unire i tre capi di principio e attaccare i fili del circuito esterno ai tre capi di fine. (Fig. 286).



Figg. 286 - 287 - Modo di fare il collegamento a stella od a triangolo dei circuiti.

Per fare il collegamento a triangolo occorre di unire la fine della fase 1 col principio della fase 2; la fine della fase 2 col principio della 3; la fine della fase 3 col principio della 1. (Fig. 287).

Generalmente negli alternatori e motori moderni le sei estremità delle tre fasi d'avvolgimento sono portate verso l'esterno ad un gruppo di sei morsetti in modo da poter passare, con facili connessioni, dal sistema a stella a quello a triangolo.

Alcuni costruttori di motori mettono in commercio dei motori trifasi con gli avvolgimenti dello statore nei quali ciascuna fase è divisa in due sezioni esattamente uguali per numero e disposizione di conduttori o di spire costituenti le

matasse. Così l'avvolgimento riesce diviso in 3 paia di sezioni che chiameremo 1 e 1_1 appartenente alla prima fase; 2 e 2_1 seconda fase; 3 e 3_1 della terza fase. Avremo sei capi di principio e sei capi fine. Si può allora fare l'accoppiamento nei seguenti modi: *a stella semplice; a triangolo semplice; a stella doppia; a triangolo doppio.*

Per fare l'accoppiamento a stella od a triangolo semplice bisogna mettere in serie fra loro ciascun paio di sezioni appartenenti alla stessa fase e mettere poi queste serie in triangolo o in stella nei modi indicati. (Fig. 288). Per fare l'accoppiamento in doppia stella o doppio triangolo bisogna mettere in parallelo fra loro ciascun paio di sezioni della stessa fase e collegare poi le coppie in triangolo od in stella. (Figura 289).

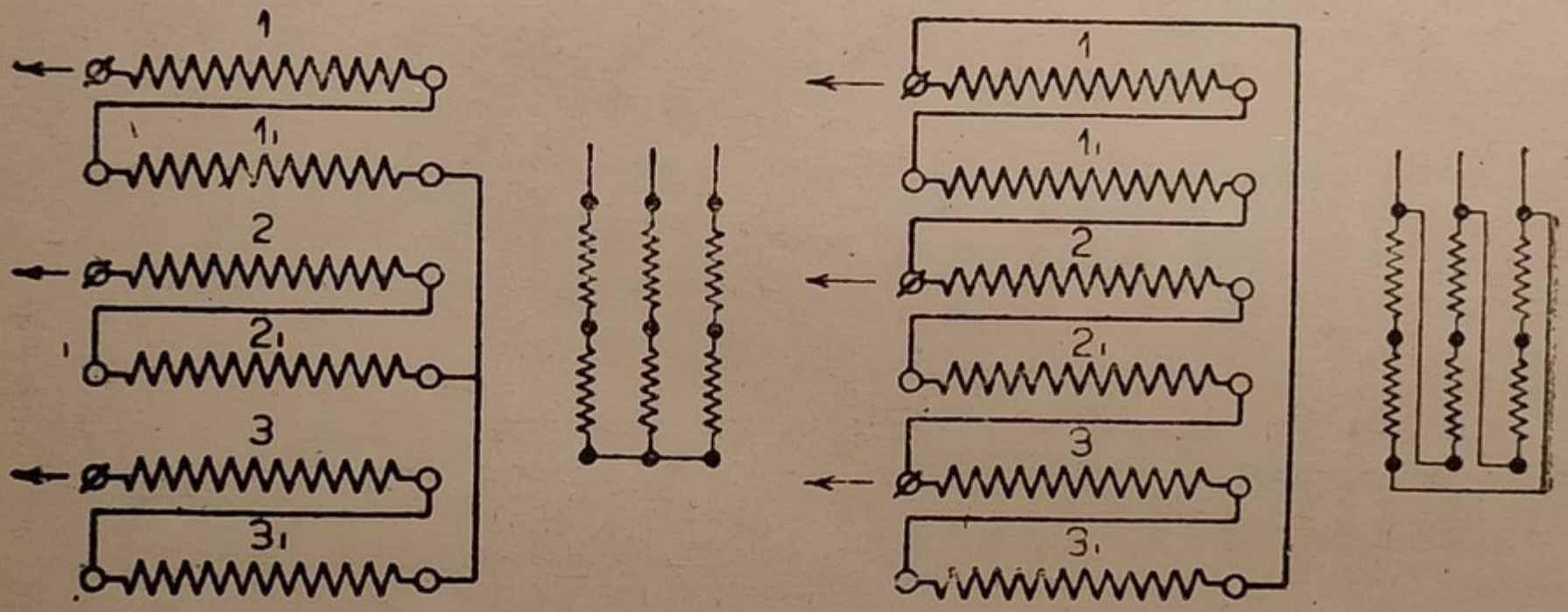


Fig. 288 - Collegamento speciale a stella ed a triangolo.

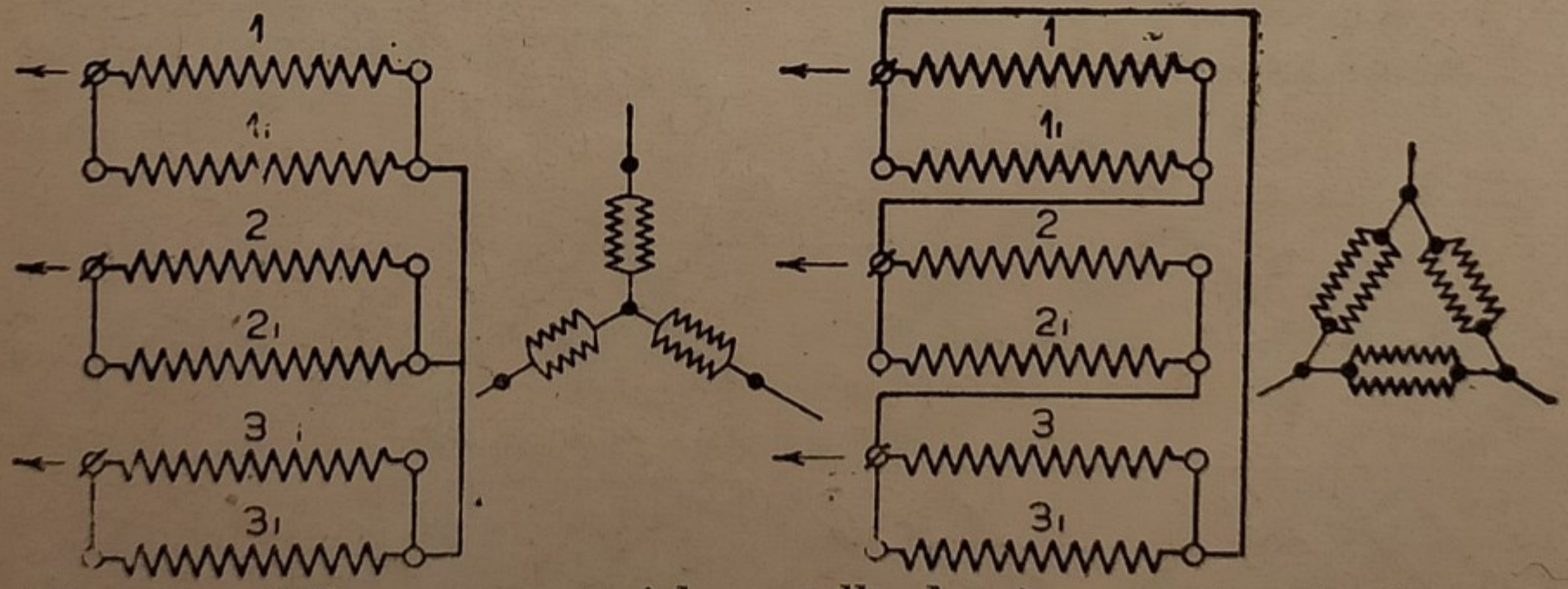


Fig. 289 - Collegamento speciale a stella doppia e a triangolo doppio.

Avendo la possibilità di fare questi accoppiamenti, lo stesso motore o lo stesso alternatore può servire per 4 tensioni.

Se E è la tensione corrispondente ad una delle sezioni avremo: accoppiamento in serie stella tensione 1,73 × 2E; accoppiamento in serie-triangolo: tensione 2E; accoppiamento in doppia stella: tensione 1,73E; accoppiamento in doppio triangolo: tensione E.

Le testate delle matasse si presentano in modo differente a seconda del tipo scelto di avvolgimento; esse possono essere a gruppi separati senza incavallature oppure incavallate in due o tre ordini. Generalmente gli avvolgimenti trifasi hanno le matasse o gruppi di matasse a testate incavallate; quelli monofasi sono a gruppi separati.

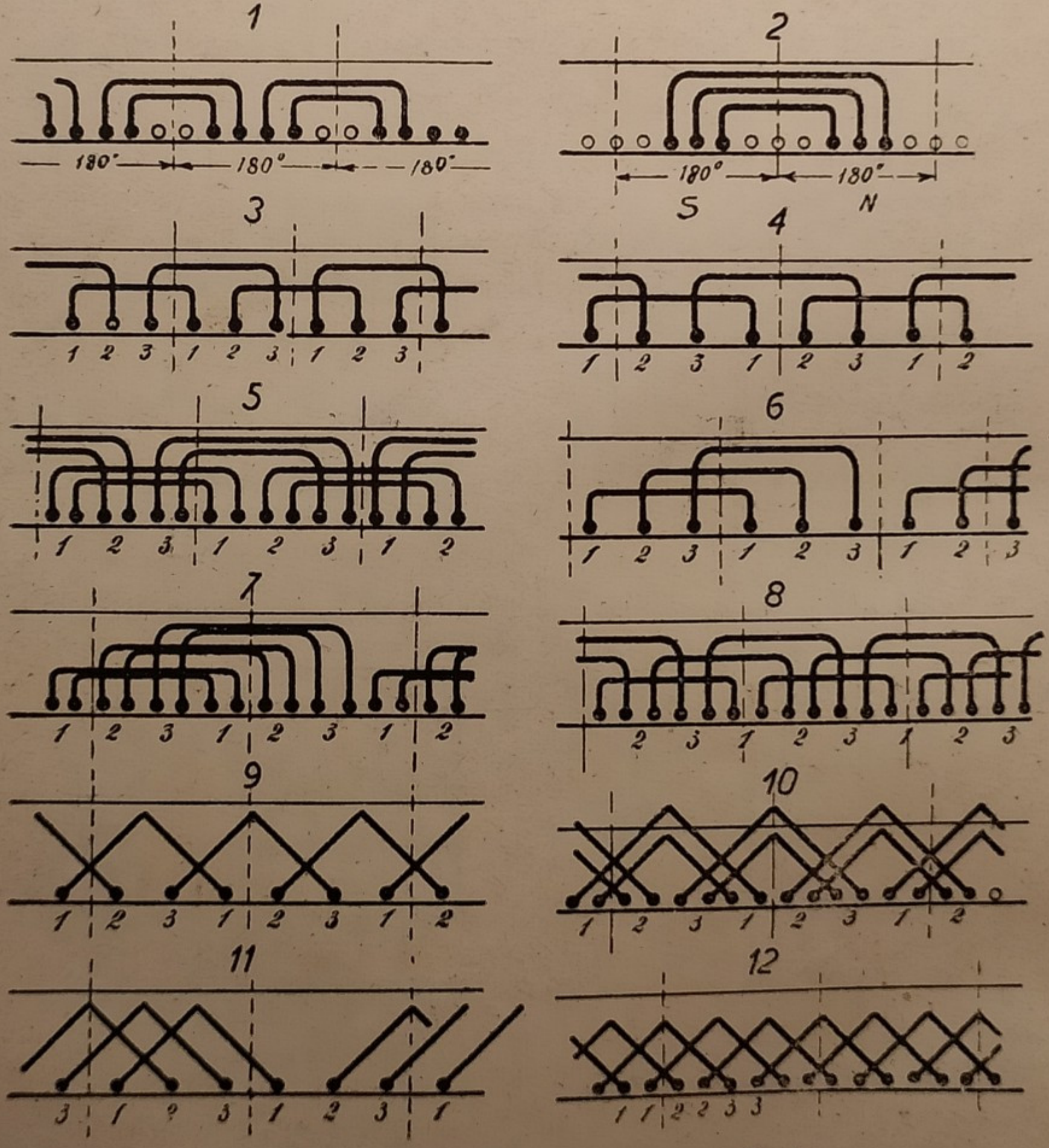


Fig. 290 - Forme diverse di matasse o di sbarre.

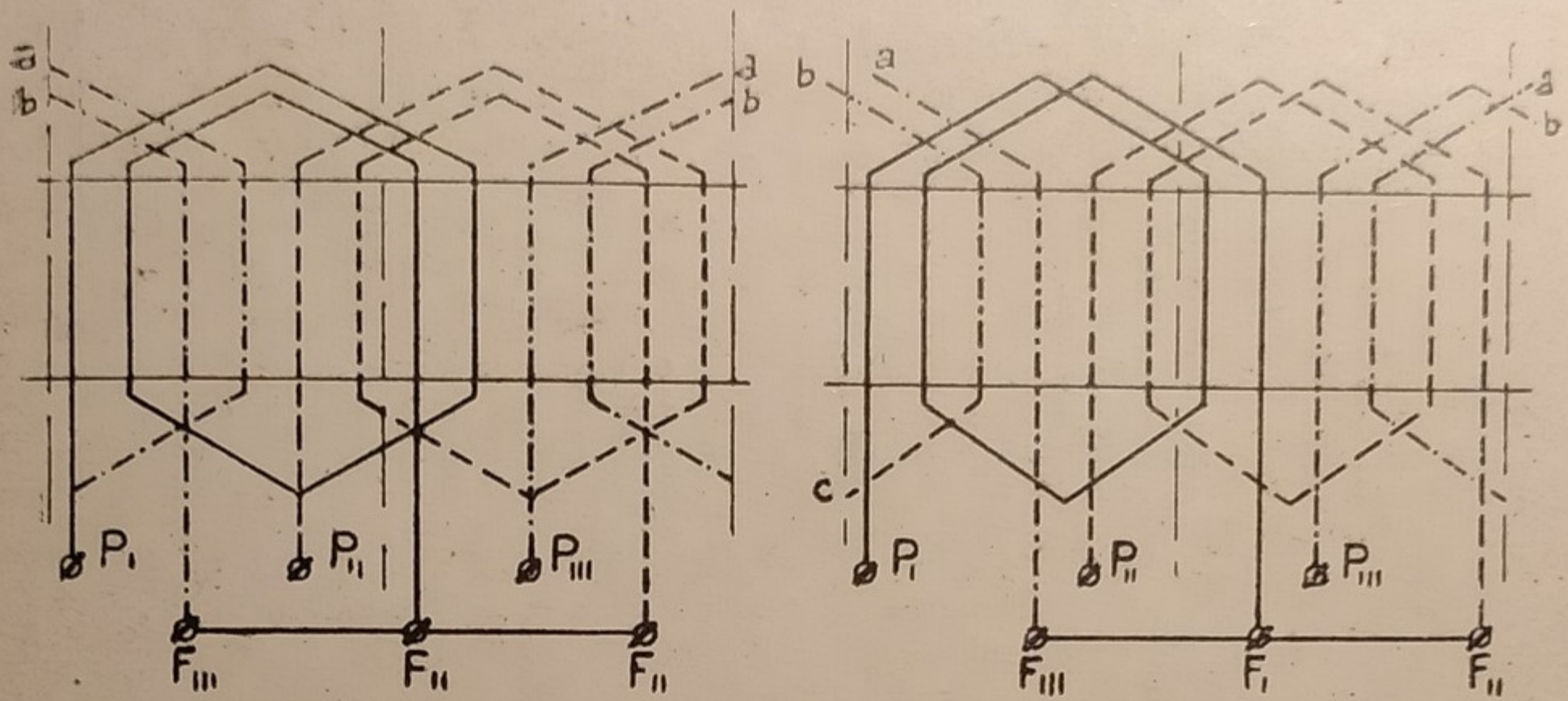


Fig. 291 - Avvolgimenti per motore trifase a 2 poli e 12 scanalature l'uno a matasse concentriche e l'altro imbricate.

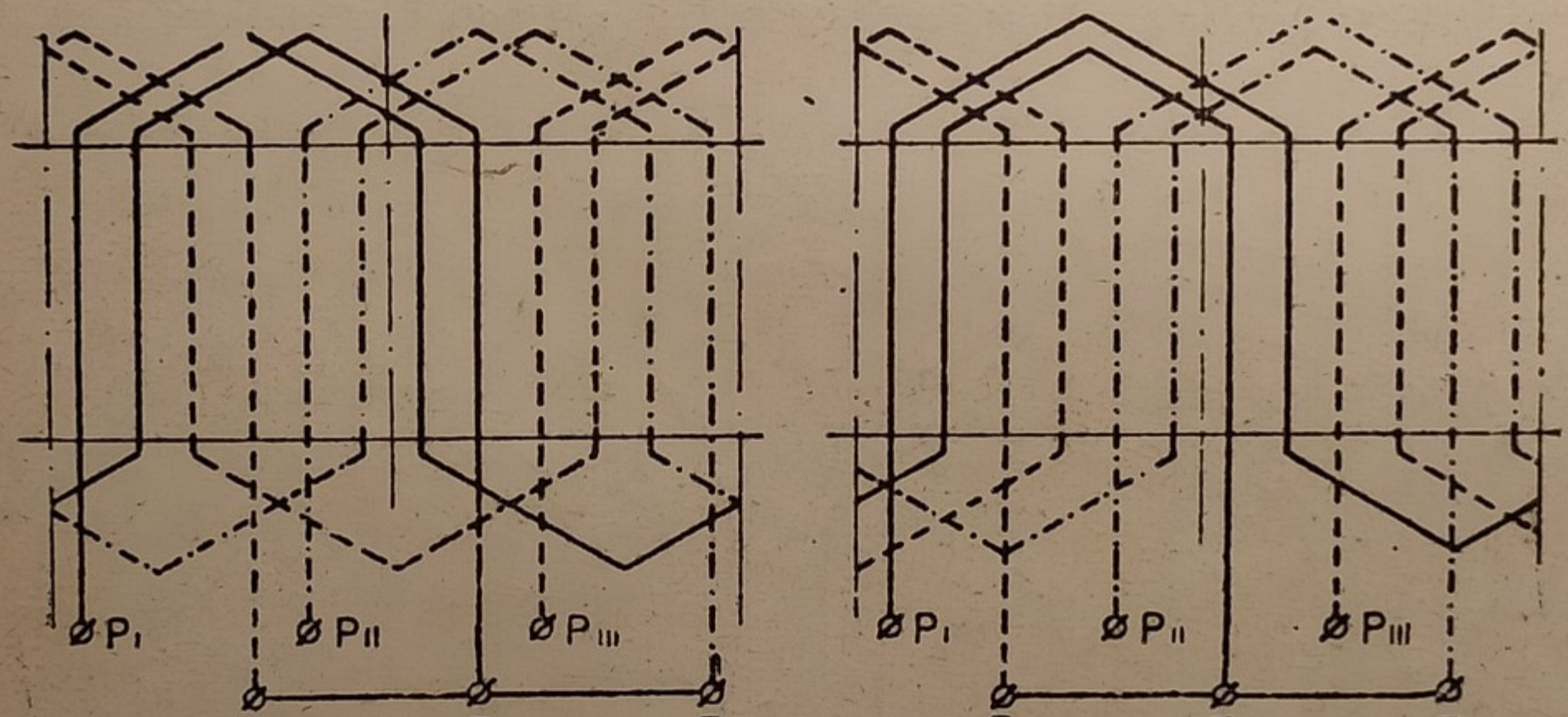


Fig. 292 - Avvolgimenti per motore trifase a 2 poli e 12 scanalature ondulate.

Le incavallature alle testate delle matasse possono essere di due grandezze (testate piccole e testate grandi) oppure uguali. Nella figura 290 abbiamo rappresentato diverse forme di testate fra quelle più comuni.

Gli avvolgimenti a sbarrette di rame sono quasi tutti del *tipo ondulato normali a regressione;* molto spesso nelle scanalature si mettono due sbarrette sovrapposte e talvolta quattro sbarrette pure sovrapposte a due a due. Facendo il tipo ondulato a regressione (fig. 290-12) si ha un avvolgimento

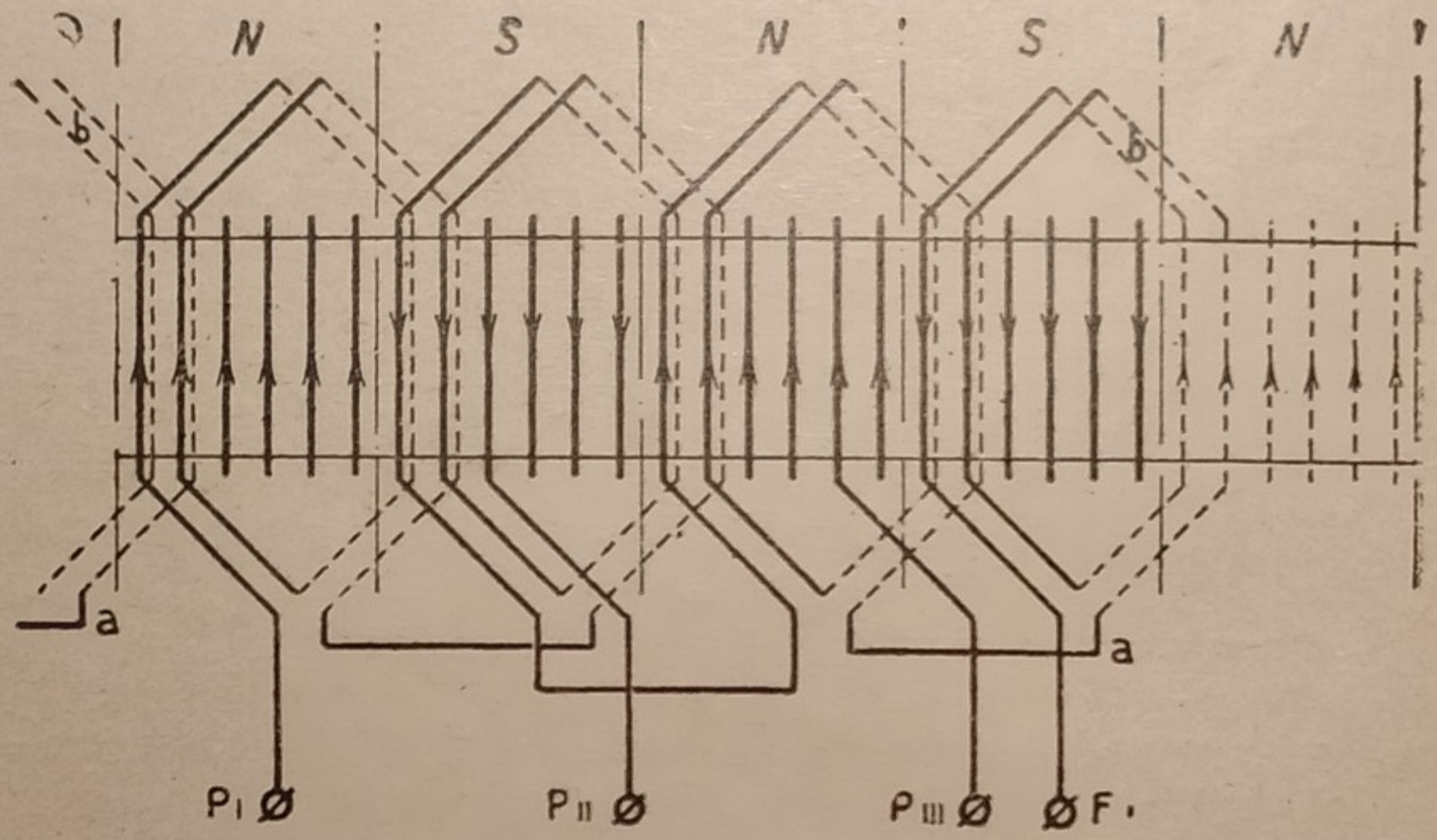


Fig. 293 - Avvolgimento per motore trifase a 4 poli con 24 scanalature.

simile a quello a sbarrette degli indotti a corrente continua con 2 o 4 sbarre per ogni scanalatura.

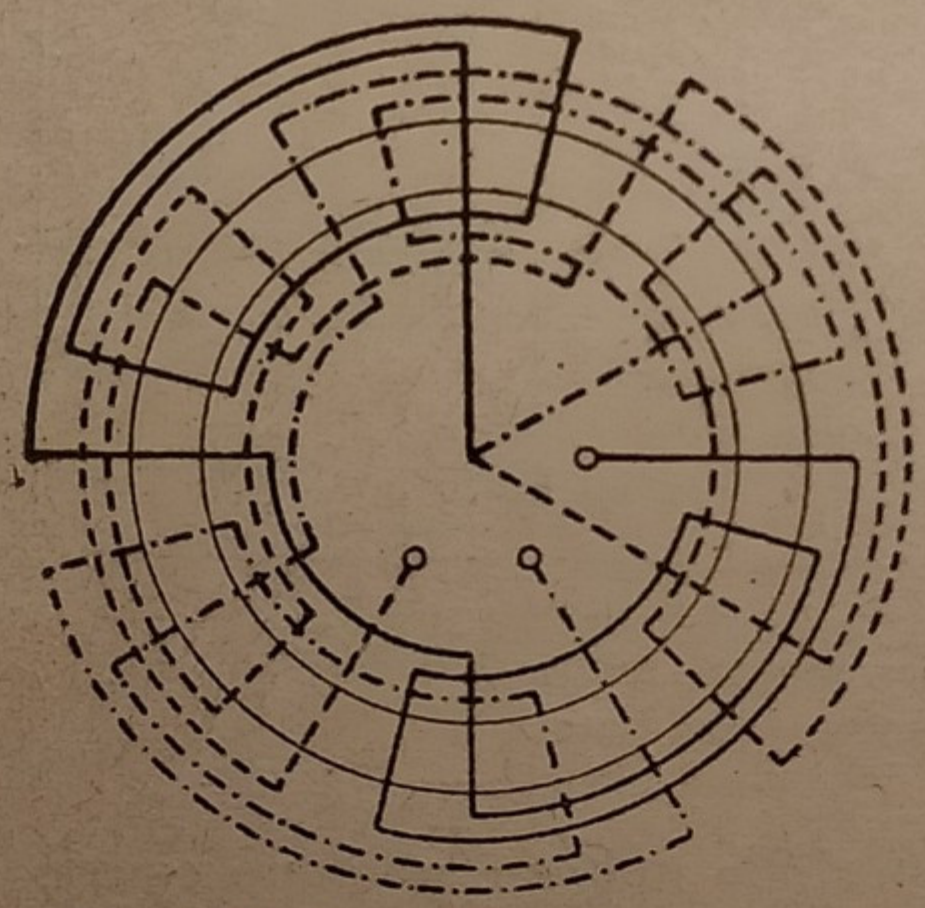


Fig. 294 - Avvolgimenti per motore trifase con 24 scanalature a matasse grandi a spirale e 4 poli

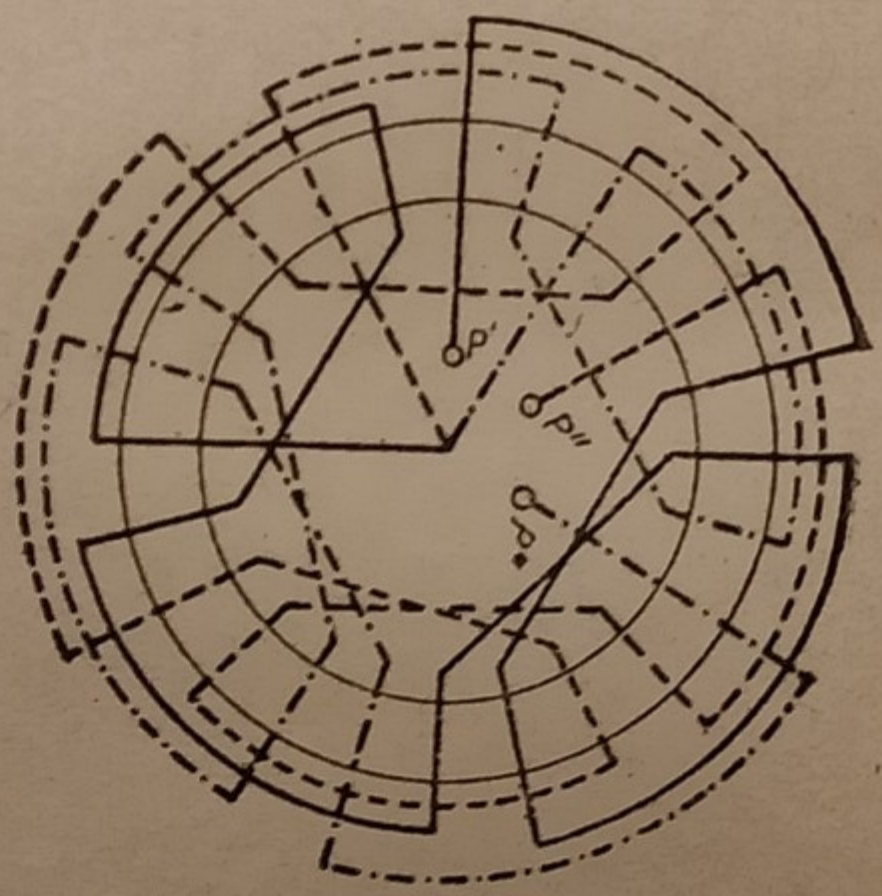
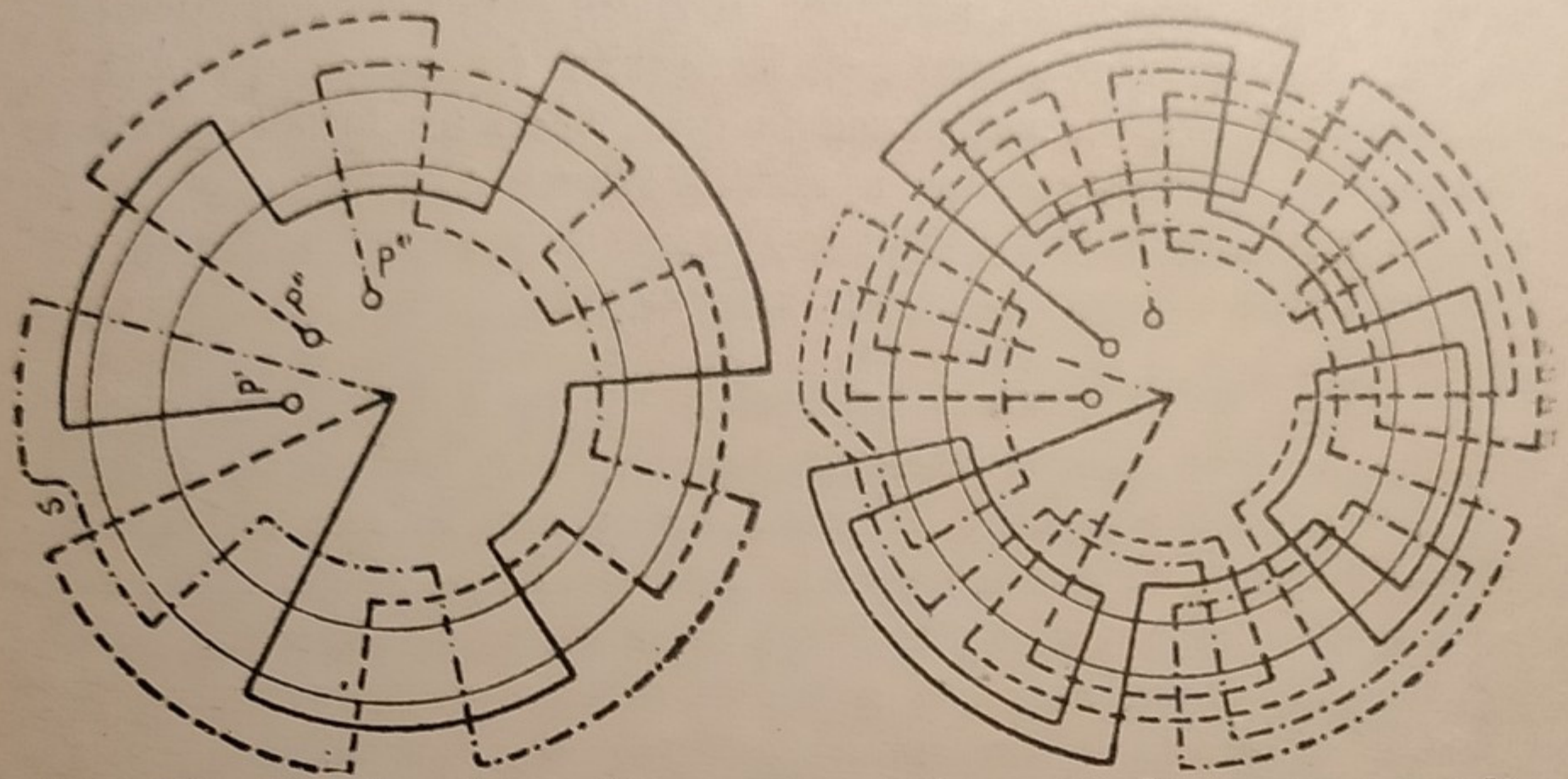


Fig. 295 - Avvolgimento per motore trifase con 24 scanalature a matasse piccole a 4 poli.

Prima di fare o rifare un avvolgimento ove non si abbia la assoluta sicurezza della disposizione delle sbarrette è prudente di disegnarlo, impiegando un colore diverso per segnare ciascuna fase. I disegni si possono fare circolari oppure sviluppati in piano; per non confondersi conviene sempre dividere il disegno in parti quanti sono i poli (segnare cioè i



Figg. 296 - 297 - Avvolgimenti per motore trifase a 6 poli a matasse grandi a spirale con 18 e con 36 scanalature o lati di matassa.

passi polari quanti sono i poli) poi segnare i conduttori od i canali per fase e per polo; mettere le frecce alternativamente in senso contrario ai gruppi sotto i poli e infine fare i collegamenti con lapis a colori. Nelle figure da 291 a 297 sono

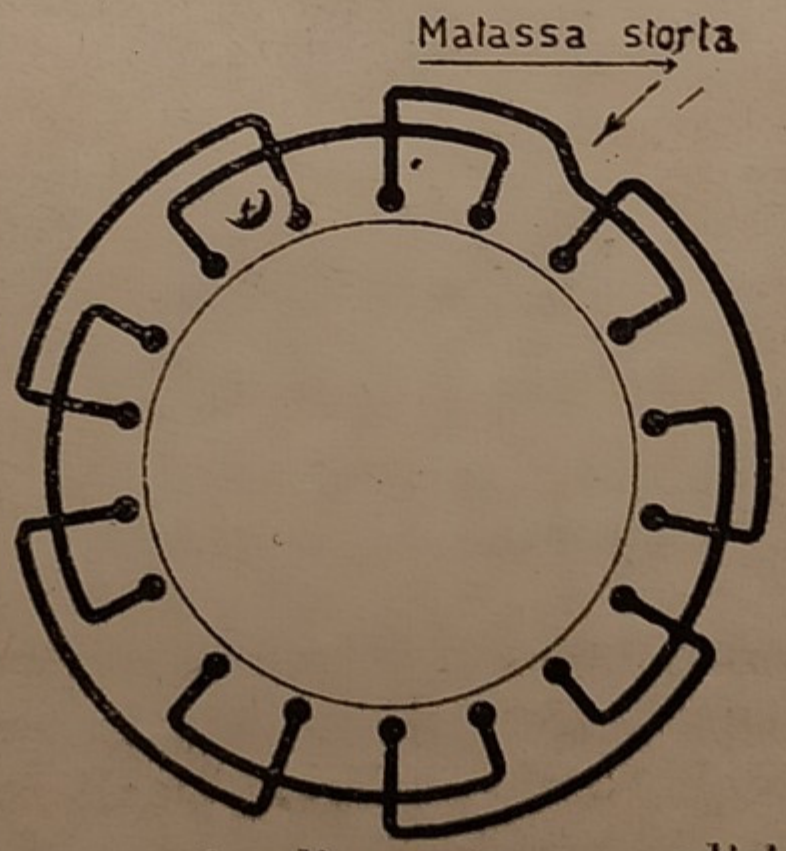


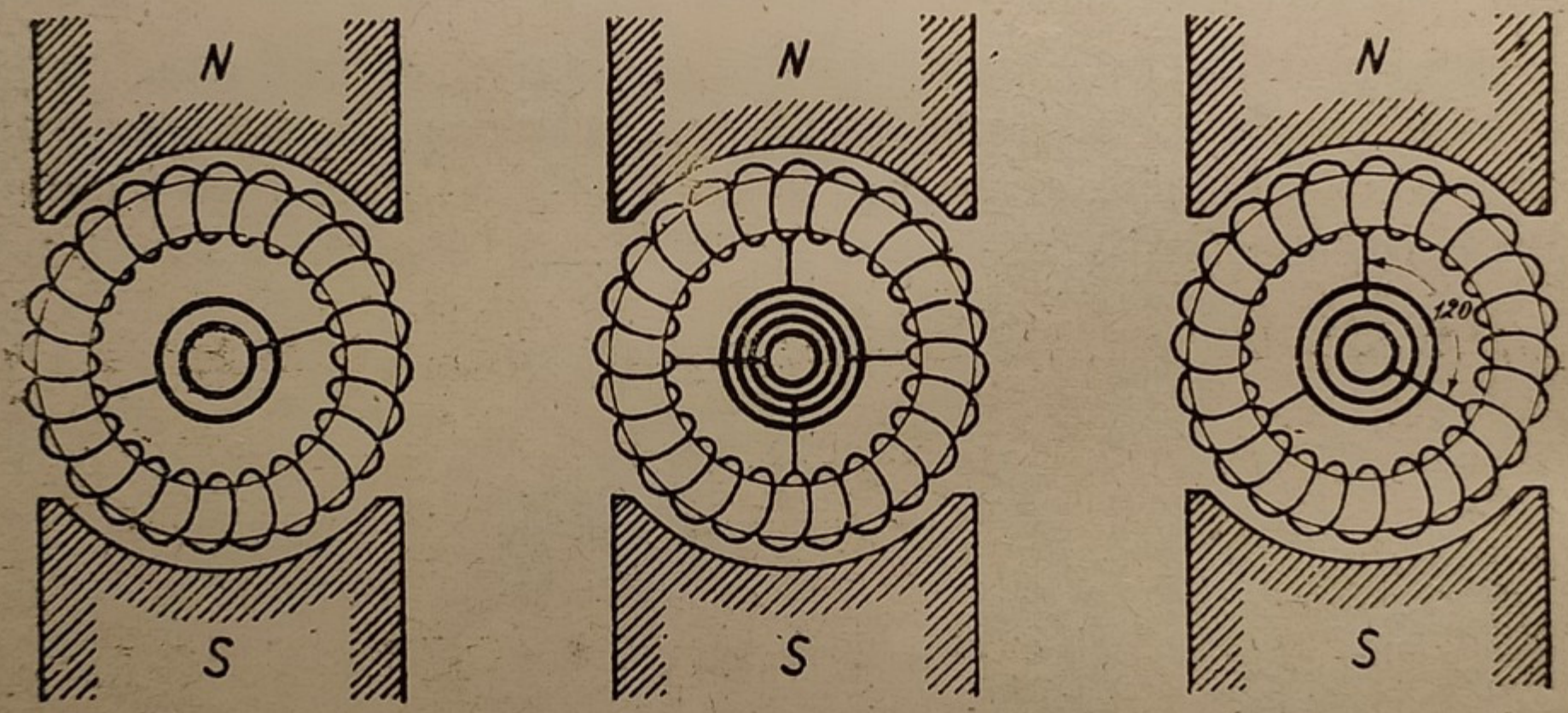
Fig. 298 - Avvolgimento a 6 poli e matasse semplici con matassa storta.

rappresentati degli avvolgimenti per motori a 2-4-6 poli fra i più comuni.

Prima di chiudere questo argomento accenneremo alle *matasse storte*. Quando si fanno degli avvolgimenti trifasi *con teste in due ordini*. (Fig. 290 n. 3 a 12) con 6-10-14-18 poli

(ossia un numero di poli non divisibile per 4) essi non possono riuscire completamente uniformi su tutta le periferia, ma contengono una matassa la quale con un lato appartiene all'ordine delle matasse a risvolti bassi e un lato a quello delle matasse a risvolti alti. La fig. 298 rappresenta un avvolgimento a 6 poli con matassa storta.

150. Avvolgimenti chiusi. — Quasi tutti gli avvolgimenti a tipo chiuso descritti per gli indotti delle dinamo possono dare corrente alternata monofase, bifase, trifase, esafase. Basterà adattare a questi indotti, oltre al collettore, degli anelli (due per la corrente monofase, quattro per bifase e tre per il trifase) sui quali strisciano delle spazzole. Gli anelli si mettono in comunicazione con l'avvolgimento facendo degli attacchi che siano rispetto ai poli a 180° elettrici per corrente monofase; 90° elettrici per correnti bifasi; 120°



Figg. 299 - 300 - 301 - Avvolgimenti chiusi per corrente monofase, bifase, trifase.

elettrici per correnti trifasi; 60° elettrici per correnti esafasi. Perciò divisa la periferia dell'indotto in tanti settori quanti sono le paia di poli (360°) si fanno degli attacchi simmetrici in ciascun settore in modo che la distanza angolare corrisponda a quanto si è detto. Così all'indotto di una *dinamo bipolare* ad anello si faranno due attacchi simmetricamente opposti per ottenere corrente monofase (fig. 299) oppure quattro a 90° per corrente bifase (fig. 300); tre a ciascun terzo della periferia se si vuol ottenere corrente trifase. (Fig. 301).

Se la *dinamo è multipolare* per poter ricavare dagli indotti correnti alternate, gli attacchi fra gli avvolgimenti agli anelli possono essere limitati a due (monofase) a tre (trifase) di un sol settore polare quando però l'avvolgimento è del tipo ondulato ed in serie. Se invece è del tipo imbricato od in parallelo gli attacchi fra i due o tre anelli devono essere fatti per ogni settore polare.

Si richiede inoltre che il numero dei conduttori formanti una fase sia uguale a quello formanti un'altra fase e ciò affinchè le f. e. m. abbiano a riuscire uguali.

Da quanto si è detto risulta che munendo opportunatamente ogni dinamo di anelli collegati agli avvolgimenti, esse diventano generatrici di corrente alternata monofase, bifase, trifase. Una dinamo munita di collettore e di anelli può servire a generare contemporaneamente corrente continua e corrente alternata. (Fig. 302). Anzi immettendo della corrente alternata sugli anelli, la macchina può girare come un motore (sincrono) nel mentre dalle spazzole sul collettore si può

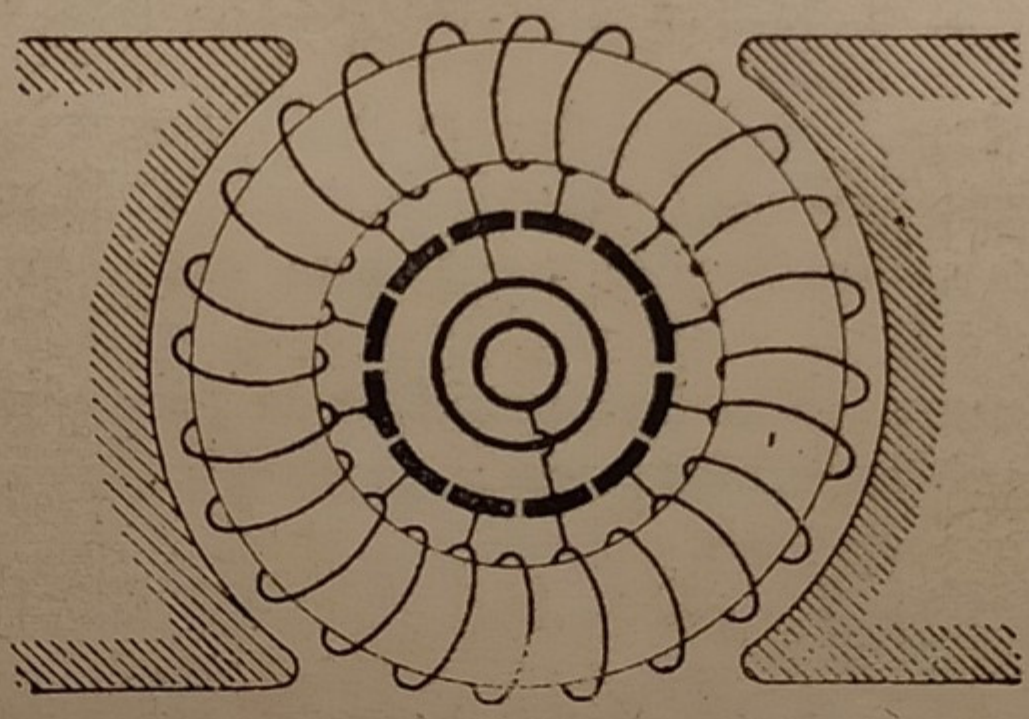


Fig. 302 - Schema di convertitore da monofase in corrente continua munito di anelli e collettore.

ottenere corrente continua. In tali condizioni quindi la macchina funziona come *convertitore* da corrente alternata in corrente continua; potrebbe anche funzionare in viceversa cioè assorbire della corrente continua e dare agli anelli corrente alternata.

151. Forza elettromotrice degli alternatori. — Uno degli scopi che più interessano i costruttori di alternatori è quel-

lo di produrre una f. e. m. alternata la quale rappresentata in curva, si discosti il meno possibile da una sinusoide; per questo occorre che (per il principio dell'induzione) il numero delle linee di forza tagliate dai conduttori abbia a variare periodicamente con legge sinusoidale. Ciò si ottiene con dispositivi e accorgimenti speciali nella costruzione degli alternatori e di cui accenneremo i principali: 1.° impiego di matasse multiple per polo e per fase invece di una matassa unica come alle fig. 279-280. 2.° Per gli alternatori a indotto fisso, tenere la larghezza delle espansioni polari da 1/2 a 2/3 del passo polare. 3.° Dare alla superficie delle espansioni polari una curvatura esterna non parallela a quella interna dell'anello dell'indotto ma una curvatura più piccola. Influiscono infine sulla forma della curva della f. e. m. la saturazione del ferro dell'indotto e la forma e larghezza dei denti tra le scanalature.

La f. e. m. media efficace che si produce in un alternatore con un campo sinusoidale è espressa dalla formola:

$$E = 2{,}22 \times f \times N \times Z \times 10^{-8}$$

dove E è la f. e. m. in volt; f la frequenza; N il flusso di linee di forza per ogni polo induttore; Z il numero totale dei conduttori in serie costituenti una fase (doppio del numero delle spire).

Ma se il campo non è sinusoidale la formola che esprime la f. e. m. si può esprimere così:

$$E = 2 \times K \times f \times N \times Z \times 10^{-8}$$

dove K è dato da tabelle che si trovano nei manuali e il cui valore dipende dal rapporto fra la larghezza delle espansioni polari ed il passo polare nonchè dal tipo di avvolgimento. I valori del coefficiente K furono studiati dal Kapp per diversi tipi di macchine. Nei buoni alternatori K varia fra 1,25 e 1,35.

Le succitate formole formano la base per la calcolazione degli alternatori e precisamente per fissare il flusso magnetico che promana dai poli, o il numero dei conduttori di avvolgimento. L'intensità del campo magnetico nell'interferro si tiene fra 5000 e 8000 linee per cmq. Gli interferri fra l'anello di

ferro dell'indotto e le espansioni polari si tengono in generale grandi: 8-20 mm. e ciò per attutire le ineguaglianze di flusso dovute alla presenza dei denti e delle scanalature. L'intensità del campo o induzione nel ferro dei denti si tiene fra 12000 e 16000 linee di forza per cmq. La velocità periferica dei poli si tiene da 25 a 30 mt. al 1".

La *tensione ai morsetti* di un alternatore è minore della f. e. m. indicata dalla formola e la riduzione è dovuta: 1.° alla perdita per effetto Joule nei conduttori; 2.° all'autoinduzione propria dell'avvolgimento indotto; 3.° alla azione diseccitante della corrente indotta.

Si dice *caduta di tensione o variazione* da carico zero a carico massimo la differenza di tensione sviluppata da un alternatore quando il carico è di zero ampère e quando è massimo. La caduta di tensione (per il motivo della reazione spiegata nel paragrafo seguente) aumenta molto quanto più il carico è induttivo. La caduta di tensione si esprime con una percentuale della tensione normale e varia: dal 6-10% per carichi non induttivi, dal 20-25% per carichi induttivi con cos $\varphi = 0{,}8$; dal 20-50% per carichi induttivi e per turbo alternatori.

Si capisce che quanto più grande è la caduta tanto più difficile è la regolazione della tensione al variare del carico in ampère, ma tanto meno nocivi sono gli eventuali corti circuiti.

152. Reazione di indotto degli alternatori. Caduta di tensione da carico zero a carico massimo. — Il fenomeno della reazione del campo magnetico indotto sull'induttore che abbiamo trattato nel capitolo delle dinamo si ripete anche per gli alternatori.

Immaginiamo che davanti ad una matassa piccola dell'avvolgimento indotto si spostino i poli induttori come è

Fig. 303 - Posizioni successive di una matassa rispetto ai poli induttori.

indicato dalla fig. 303. Quando il flusso dei poli vien tagliato dai lati di matassa (posizione 1) la f. e. m. si troverà o nel periodo crescente o in quello decrescente (AB o BC o CD ecc. della fig. 304). Quando la mezzaria dei poli coincide coi lati di matassa (posizione 2) la variazione di flusso magnetico è massima e quindi massima la f. e. m. indotta (punti B o D); quando infine le mezzarie dei poli corrispondono alle mezzarie delle matasse (posizione 3) la f. e. m. sarà zero (punti A o C o E) perchè il flusso arrivato al massimo tende a diminuire. Si ha cioè nessuna variazione di flusso.

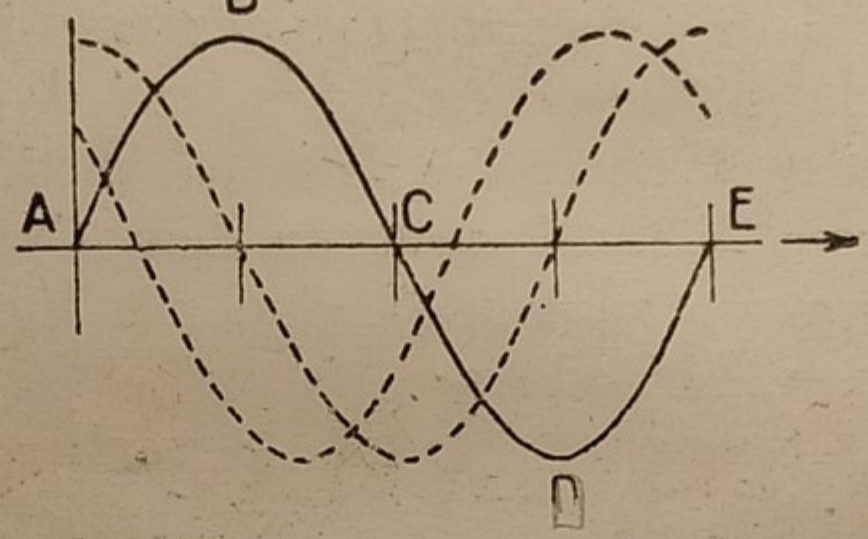


Fig. 304 - Sinusoidi della f. e. m. e del campo in un alternatore.

Riassumendo quando il flusso induttore abbracciato dalla matassa è massimo, la f. e. m. è zero; viceversa quando il flusso è zero la f. e. m. è massima. Perciò il flusso Φ e la f. e. m. sono rappresentabili da due vettori ruotanti il primo in precedenza di 90° del secondo.

Ora supposto che la *corrente indotta sia in fase colla f. e. m.*, avremo che nella posizione 2 corrente e *flusso indotto* sarà massimo mentre nella posizione 3 corrente e flusso indotto sarà zero. Cioè nell'anello di ferro di un alternatore monofase noi vediamo formarsi tanti *poli magnetici pulsanti* risvolti verso l'interno in mezzaria alle matasse e come è indicato dalla fig. 305 in punteggiato e colle lettere n - s.

Seguendo la regola di Fleming delle tre dita si trova che i poli *s - n - s - n* sono in avanzo di fase di 90° elettrici rispetto a S - N - S - N ecc. In questa posizione l'effetto di reazione dei poli indotti sui poli induttori è quasi nullo.

Se l'alternatore è trifase o polifase allora il campo magnetico creato dalle correnti indotte ed in fase con esse riesce formato da tanti *poli, non pulsanti, ma ruotanti* di polarità *n - s - - n - s* e spostati di 90° in avanzo rispetto ai poli induttori.

E' evidente che la posizione reciproca della serie dei poli induttori e dei poli indotti dipende dallo sfasamento della corrente nell'indotto. Se questa corrente invece di essere in fase colla f. e. m. è in ritardo (caso in cui il carico è induttivo) i poli *n - s - n - s* rimarranno in arretrato rispetto alla posizione indicata nella fig. 305. Se invece la corrente indotta è in anticipo allora i poli *n - s - n - s* si sposteranno in avanti. Nel primo caso i poli indotti tendono a demagnetizzare i poli indut-

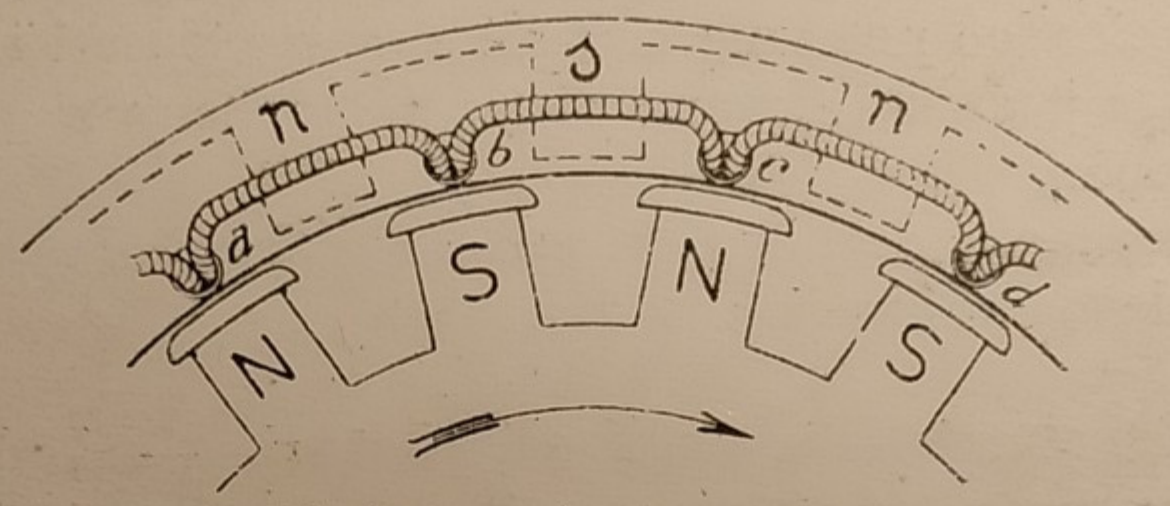


Fig. 305 - Come si formano i poli indotti nei nuclei di ferro degli alternatori.

tori diminuendone l'efficacia, onde vi sarà un abbassamento di tensione. Nel secondo caso succederà l'opposto cioè i poli indotti aiuteranno a rinforzare i poli induttori — si avrà quindi un aumento della tensione.

Se cos φ fosse zero, ossia la corrente indotta fosse in ritardo di 90° i poli *n - s - n - s* si porterebbero esattamente sui poli omonimi N - S - N - S. (Fig. 306) diseccitandoli.

Se cos φ fosse zero con corrente indotta in anticipo di 90° i poli *n - s - n - s* si portebbero invece ad affacciarsi ai poli di nome contrario induttori S - N - S - N. (Fig. 307), cioè andrebbero a sopraeccitare i poli induttori.

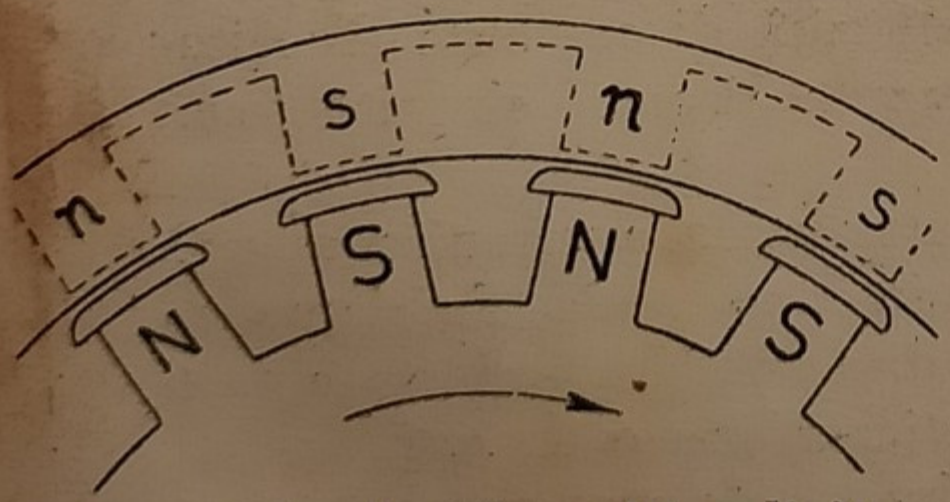


Fig. 306 - Posizione dei poli indotti o riflessi quando $\varphi = 90°$ in ritardo

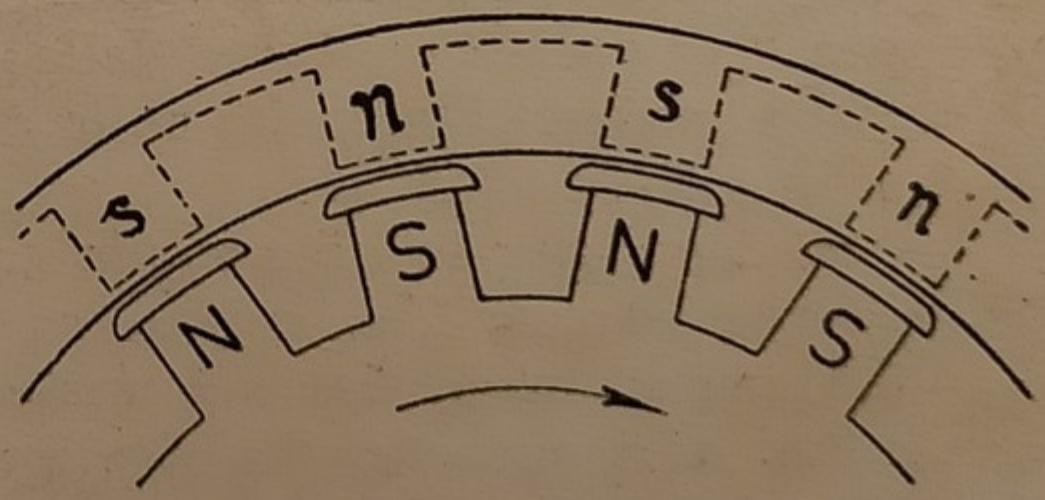


Fig. 307 - Posizione dei poli indotti o riflessi quando $\varphi = 90°$ in anticipo.

La conseguenza pratica di questo fenomeno è che gli alternatori subiscono un abbassamento di tensione (a eccitazione costante) tanto più forte quanto più grande è la intensità della corrente e quanto più grande è il *ritardo di fase* della detta corrente ossia è più grande *cos* φ .

Viceversa se gli alternatori sono connessi con una rete di cavi sotterranei o con linee aeree lunghe qualche centinaio di chilometri ad altissima tensione e quindi possono avere un *carico capacitativo* notevole con gli ampère sfasati in *anticipo di fase* allora possono elevarsi di tensione mano mano aumentano gli ampère.

Possono anche eccitarsi da soli e (pericolo da evitarsi) subire sopraelevazioni nocive.

153. Caratteristiche degli alternatori. — I diagrammi che più servono a caratterizzare il comportamento di un alternatore sono:

1.° *Caratteristica della f. e. m. a circuito aperto o di magnetizzazione.*

2.° *Caratteristica di corto circuito.*

La prima si ottiene facendo funzionare a velocità normale con circuito esterno aperto la macchina e elevando per gradini crescenti l'intensità della corrente d'eccitazione del campo e la corrispondente tensione ai morsetti. La caratteristica si ottiene portando in ascisse gli ampère d'eccitazione e in ordinate le tensioni.

La seconda si ottiene chiudendo in corto circuito attraverso ad amperometri i morsetti della macchina e misurando per ogni valore crescente della intensità di corrente d'eccitazione (ascisse) l'intensità della corrente di corto circuito (c.c.) (Fig. 308).

Come per le dinamo, la caratteristica a circuito aperto rappresenta, la f. e. m. interna e in altra scala, l'andamento del campo magnetico nel nucleo di ferro dell'indotto e perciò si dice anche *curva di magnetizzazione* o di *saturazione*. Essa è formata da un tratto rettilineo e da una curva.

La corrente di c. c. è una corrente sfasata di 90° rispetto alla fase della f. e. m. poichè il circuito indotto funziona come

una bobina di autoinduzione (parag. 79 e seguenti). La caratteristica di c. c. di solito è una linea retta. (Vedi retta Icc della figura 308).

Consideriamo il punto C della caratteristica a vuoto Vo e tiriamo la perpendicolare CA all'asse delle ascisse. Essa interseca la caratteristica Icc nel punto B. Lo OA rappresenterà l'eccitazione comune alle due caratteristiche. Possiamo dire che la corrente AB di corto circuito e cioè sfasata di 90° in ritardo rispetto alla f. e. m., è la corrente di reazione d'armatura o di controeccitazione capace di annullare la f. e. m. Vo = AC o di neutralizzare l'effetto di induzione della corrente di eccitazione OA; ossia gli ampèrspire induttori sono uguali agli ampèrspire di indotto in corto circuito. Di solito se AC è la tensione normale a vuoto, la corrente AB di corto circuito è di 1,5 a 2,5 la corrente normale di targhetta dell'alternatore.

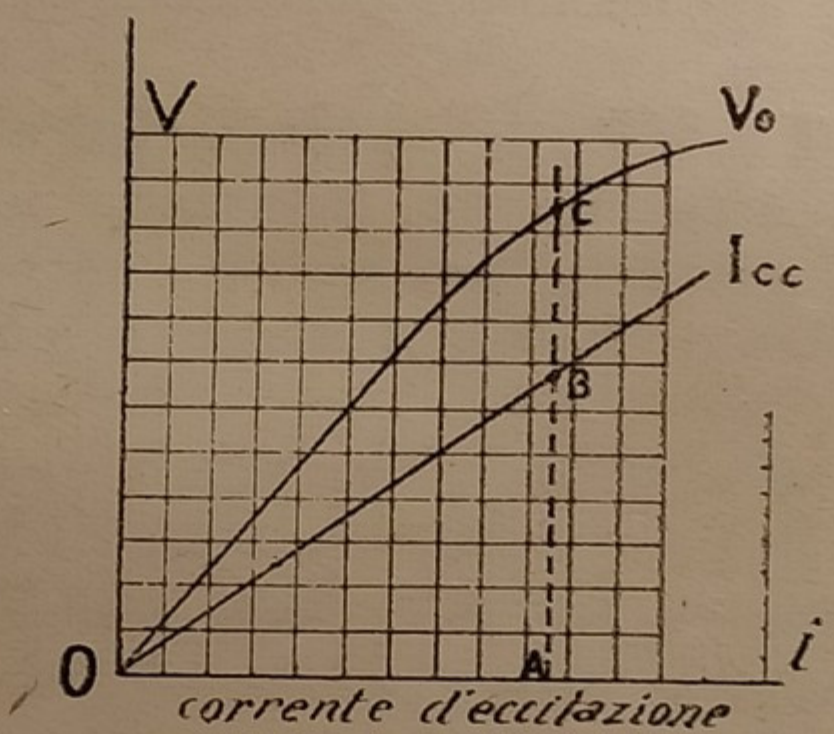


Fig. 308 - Caratteristica a circuito aperto Vo e di corto circuito Icc di un alternatore.

Basandosi sul rilievo di queste due curve caratteristiche diversi autori (Kapp, Behn Eschenburg, Rothert, Potier) hanno indicato il modo di trovare con operazioni grafiche per ogni ascissa (ossia per ogni eccitazione di campo) il valore approssimativo della tensione effettiva ai morsetti corrispondente al carico normale di In Ampère sfasati di un certo angolo φ. Così con questi metodi si può trovare la caduta di tensione oppure tracciare le *caratteristiche* esterne o a *cir-*

cuito chiuso per diversi valori di I e di cos φ. Questi metodi danno però valori approssimati (1). Diamo più avanti il metodo grafico di Rothert.

Dalle caratteristiche esterne si deducono le cadute di tensione da carico zero a pieno carico. Interessa talvolta di conoscere le reattanza dell'indotto di un alternatore trifase a stella. Si può trovare chiudendo in corto circuito due fasi inserendo un amperometro e mettendo un voltmetro fra la fase libera ed il collegamento in c. c. delle altre due. La reattanza è data da:

$$X = \frac{V}{\sqrt{3}\, I}$$

154. Calcolo grafico della caduta di tensione secondo Rothert. — Noi ci limiteremo al metodo del Rothert che da valori abbastanza approssimati pel caso di alternatori di costruzione più comune.

Siano OVo (Fig. 309) la caratteristica a vuoto e OIc la caratteristica di corto circuito. Si traccia una retta OB la quale faccia coll'asse delle ordinate un angolo φ corrispondente allo sfasamento che ha il carico in ampère dell'alter-

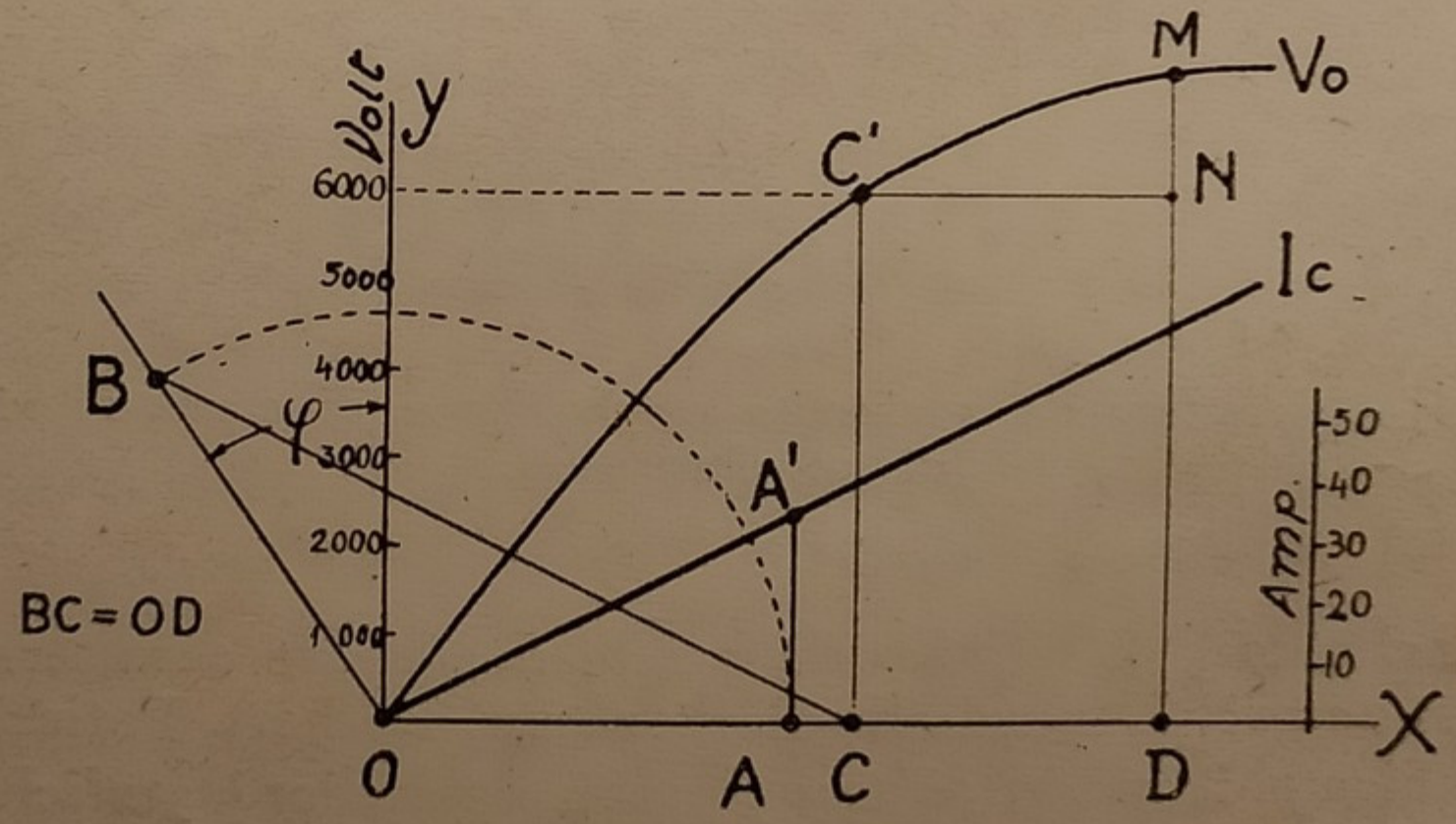


Fig. 309 - Metodo grafico Rothert per trovare la caduta di tensione degli alternatori.

(1) Consultare: Elettrotecnica del Prof. L. Lombardi od anche La tecnica delle correnti alternate del Prof. G. Sartori.

natore e per il quale si vuol trovare la caduta di tensione. Sia OA l'eccitazione in ampère corrispondente nella caratteristica di corto circuito ad una corrente AA^1. Si fa centro in O e si descrive un circolo con raggio OA fino a incontrare in B la retta spostata di φ gradi rispetto all'asse delle ordinate. Sia OC l'eccitazione in ampère corrispondente alla tensione normale CC^1 nella caratteristica a vuoto. Si conduce la retta BC e da O si porta un tratto OD = BC. Si innalza la perpendicolare in D fino a incontrare in M la curva Vo. Dal punto C^1 si tira un'orizzontale C_1N.

Il tratto MN rappresenta la caduta di tensione ricercata da carico zero con tensione normale, al carico di AA_1 ampère sfasati di φ gradi rispetto alla tensione ai morsetti.

Si può così tracciare una curva dei punti N variando il carico AA^1. Facendo $\varphi = 0$ si ottiene la curva di variazione della tensione quando il carico non è induttivo.

Le curve ricavate con questo metodo danno in generale valori un po' maggiori dei reali.

155. Accoppiamenti degli alternatori. — Quando in una centrale la richiesta di energia va aumentando o diminuendo si aggiungono o si tolgono degli alternatori dalle *sbarre* che servono a comunicare la corrente al circuito esterno. L'operazione necessaria colla quale si può aggiungere un alternatore si dice *accoppiamento in parallelo*. L'accoppiamento in serie non ha alcuna applicazione.

Le condizioni per cui due o più alternatori della stessa frequenza si possono in un determinato istante mettere in parallelo sono:

1.° Le loro tensioni e curve di tensione devono essere uguali.

2.° Le loro fasi devono coincidere, cioè devono coincidere gli istanti di massimo e di zero tensione.

Quando due alternatori soddisfano a queste condizioni si dice che sono in *sincronismo*. In tale momento si possono accoppiare in parallelo.

Il dispositivo generalmente impiegato per riconoscere se le fasi di due alternatori sono in sincronismo è quello delle lampade applicate conformemente alla fig. 310.

Supponiamo l'alternatore I sia in servizio e che si debba

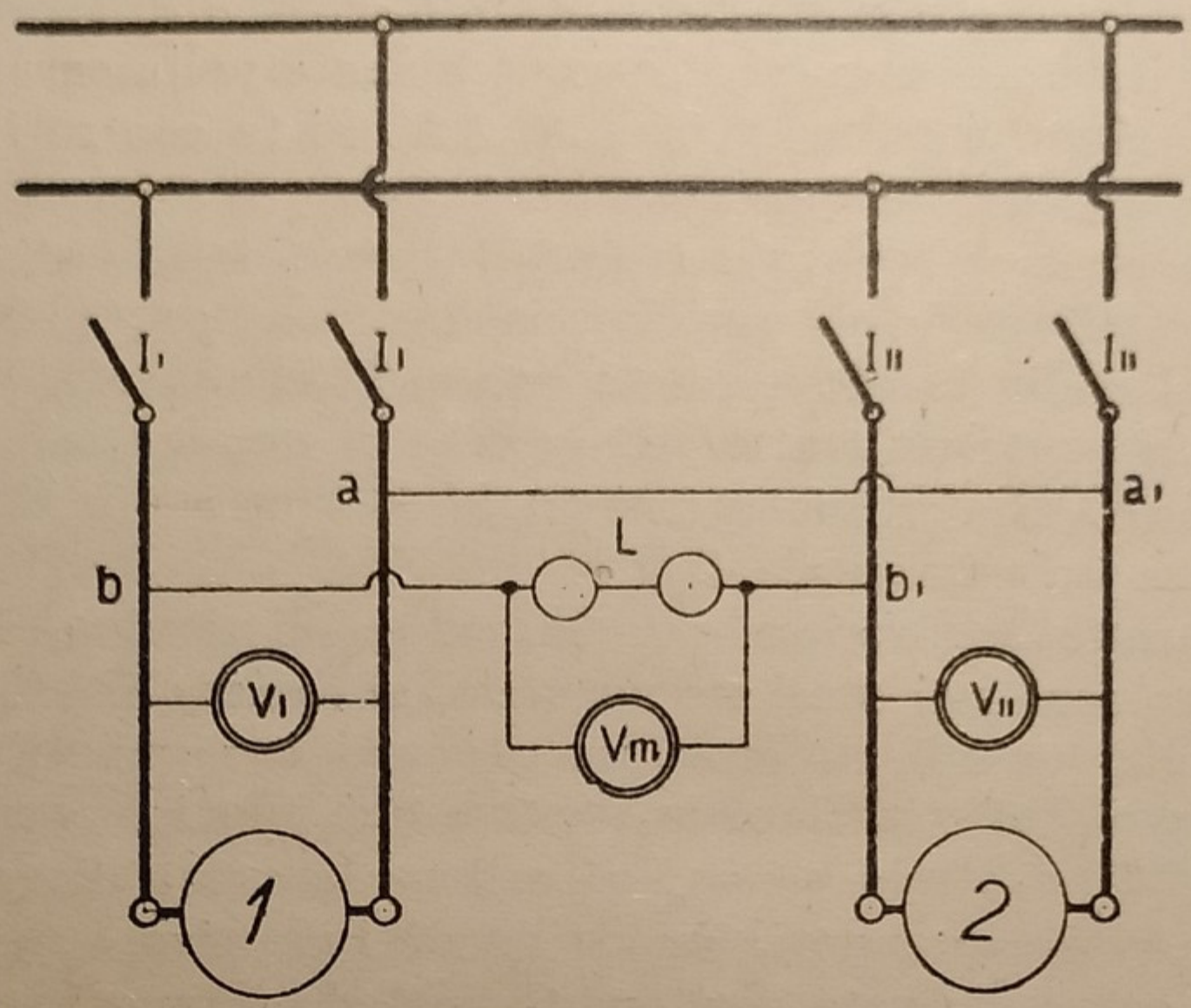


Fig. 310 - Schema per l'accoppiamento in parallelo di due alternatori.

innestare in parallelo l'alternatore 2; si tratta di stabilire l'istante esatto in cui si può chiudere l'interruttore I_2 in modo che le fasi delle due tensioni date da 1 in servizio e da 2, siano in sincronismo. Si mette un filo sottile fra *a* e *a'* ed un altro fra *b* e *b'* contenente due lampadine di tensione uguale a quella degli alternatori o una lampada di doppia tensione. Si faccia muovere l'alternatore 2 e si regoli la sua tensione in modo che il voltmetro V_2 segni la stessa tensione di V_1. Se la velocità dell'alternatore 2 fosse *esattamente* uguale a quella dell'alternatore 1 e le fasi fossero coincidenti, allora le due lampade L resterebbero spente cioè indicherebbero che vi è perfetto sincronismo fra le due macchine. Se invece pur avendo la stessa esatta velocità l'alternatore 2 avesse la sua fase in opposizione a quella di 1 (fig. 311), le due lampade L rimarrebbero accese, essendovi fra i fili *b* e *b'* una tensione doppia di quella di ciascuna macchina come se si unissero due pile in serie fra loro.

Ma generalmente succede che, avviato l'alternatore n. 2 esso prende una velocità di poco maggiore o di poco minore della macchina n. 1. Si verifica allora questo fenomeno: essendo la tensione generata dalla 2 di frequenza poco maggiore o poco minore di quella della 1, si avranno degli istanti in

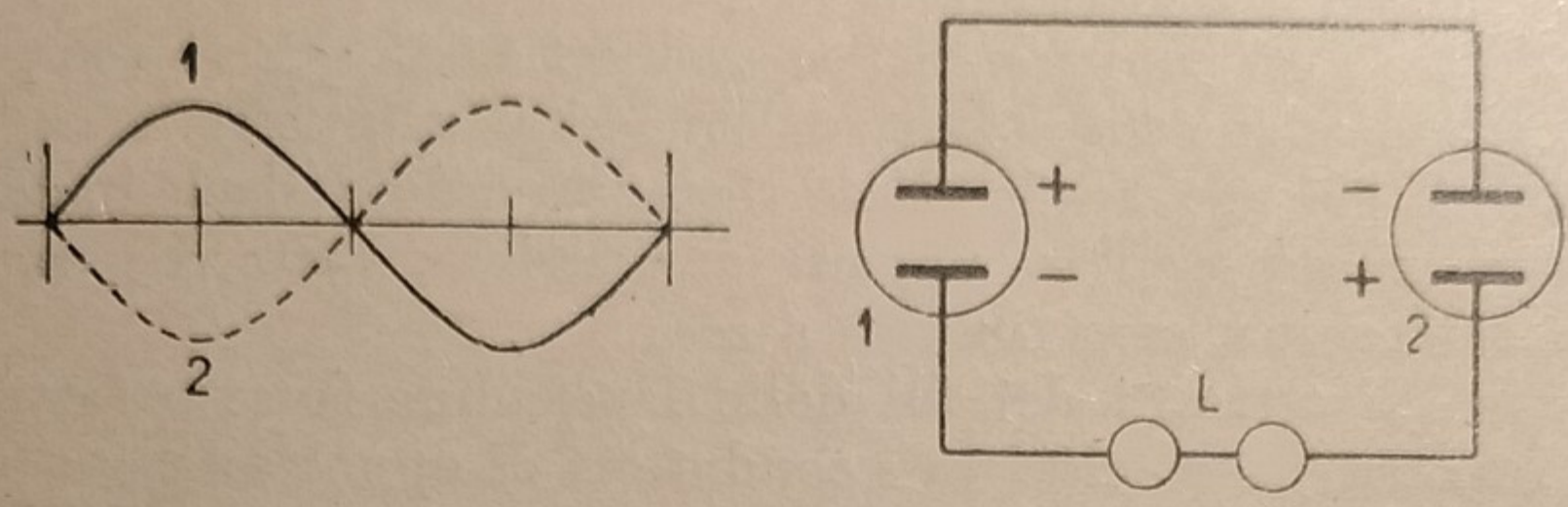


Fig. 311 - Schema per dimostrare il funzionamento delle lampade di sincronismo.

cui le fasi sono in opposizione e degli istanti in cui sono coincidenti, per cui le lampadine ora saranno accese ed ora spente. Difatti succede che le lampade continuano ad accendersi e spegnersi con una frequenza tanto più rapida quanto più differenti sono le velocità dei due alternatori. Cura dell'elettricista è quella di governare la velocità della macchina

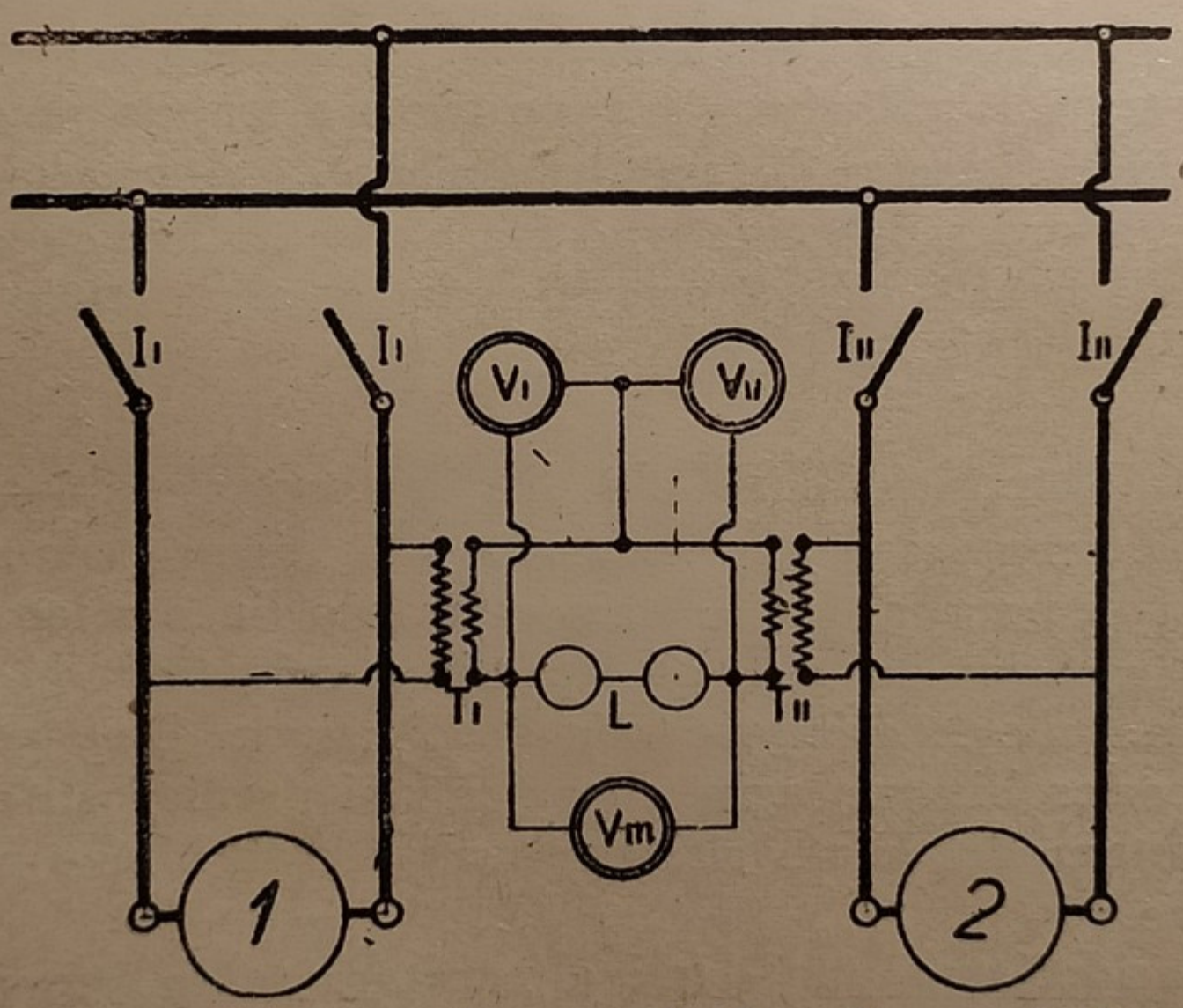


Fig. 312 - Schema di accoppiamento di due alternatori alta tensione.

2 in modo che il *battimento* delle lampade riesca sempre più lento. Allorchè questo battimento è diventato lentissimo si attende che le lampadine abbiano a spegnersi completamente e in quel momento si chiude l'interruttore I_2. Le macchine restano così accoppiate in parallelo.

Oltre alle lampade si usa di inserire in derivazione alle medesime anche un volmetro Vm, detto *voltmetro di sincronismo*, il cui ago, seguendo le stesse vicende delle lampadine, continuerà ad oscillare da zero al massimo. Fatto il parallelo delle macchine, esso rimarrà a zero.

Se gli attacchi dei fili delle lampadine fossero fatti tra a e b' e tra b e a', cioè tra i conduttori di opposta fase o polarità, le lampadine nell'istante del sincronismo sarebbero accese.

Sbagliando nel fare l'accoppiamento, si formerebbe un'intensa corrente tra l'alternatore 1 e l'alternatore 2 tale da fondere le valvole o far scattare l'interruttore automatico.

Il sistema di trovare il momento di sincronismo fra due macchine colle lampadine è molto semplice, ma lascia l'elettricista incerto se il battimento è dovuto ad un eccesso o ad una deficienza di velocità dell'alternatore 2 da accoppiarsi. Perciò nelle centrali importanti si sono adottati degli apparecchi speciali detti *sincronizzatori* i quali segnano sopra un quadrante se la velocità è troppo forte o troppo piccola.

Quando si tratta di fare il parallelo di alternatori ad alta tensione allora si intromettono fra i rispettivi circuiti ad alta tensione e quelli delle lampadine dei trasformatori riduttori di tensione. (Fig. 312).

156. Marcia in parallelo di più alternatori. — Quando diversi alternatori di una centrale o di diverse centrali sono collegati in parallelo sulle stesse sbarre o linee a tensione costante, il carico in KW si ripartisce regolando la potenza meccanica che li aziona e non l'eccitazione. Cioè per ripartire il carico bisogna agire sopra organi predisposti dei regolatori automatici di velocità applicati alle turbine o macchine a vapore.

Consideriamo uno degli alternatori (e in generale una macchina sincrona) in parallelo con altri e facciamo variare la corrente d'eccitazione i del campo gradualmente a mezzo di reostati. Si osserva che partendo da una debole magnetizzazione e andando verso la massima (mantenendo il carico in KW costante) la corrente prodotta I è grande in principio; poi va gradatamente diminuendo fino ad un minimo poi ritorna a crescere. Il fenomeno è rappresentabile con una cu-

va, detta *curva a V*, che si ottiene portando in ascisse i valori di *i* e in ordinate quelli di I dati dall'indotto dell'alternatore (vedi fig. 313).

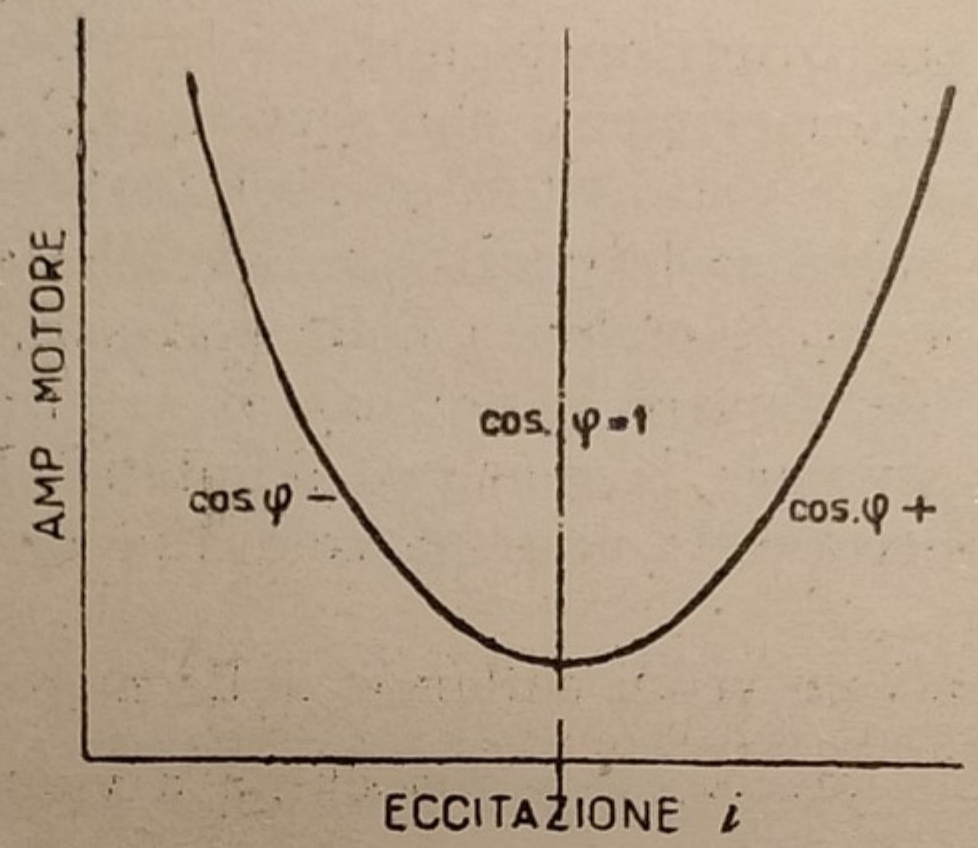


Fig. 313.

Se con un wattmetro si misura la potenza si trova che durante l'esperimento essa è rimasta costante mentre il fattore di potenza è passato da negativo (corrente in anticipo) a positivo (corrente in ritardo). La corrente I minima corrisponde a cos $\varphi = 1$. La curva a V riesce più alta o più bassa, più stretta o più larga a seconda del carico in KW e della f. e. m. E.

Il fenomeno si spiega così: nel periodo di sottoeccitazione l'alternatore richiama dagli altri una componente in anticipo della corrente per elevare il valore del campo in modo corrispondente alla f. e. m. E. Nel periodo di sovraeccitazione l'alternatore richiama una corrente in ritardo atta a neutralizzare l'eccitazione esuberante.

Tutto ciò si spiega col giuoco della reazione d'armatura esposta al parag. 152. Fenomeno perfettamente simile succede ai motori sincroni, invertendosi però il segno di cos φ. Le componenti della corrente di indotto in anticipo o in ritardo si dicono *correnti magnetizzanti* o *sincronizzanti*.

157. Prove di collaudo ed esperimenti sulle dinamo ed alternatori. — Le prove che si possono fare sulle macchine elettriche servono a constatare se i dati di tensione, intensità, potenza, rendimento, riscaldamento per cui furono

costruite e garantite corrispondono al vero. Queste prove costituiscono le così dette *prove di collaudo*; hanno per scopo di constatare che una macchina corrisponde alle garanzie date o di uso per un buon funzionamento.

Vi sono altri esperimenti che servono più al costruttore che all'acquisitore e che hanno scopo scientifico o di studio per mettere in evidenza le qualità magnetiche e quindi come varia la tensione in dipendenza della eccitazione, della velocità, del carico, del fattore di potenza, ecc.; altre servono per le dinamo per studiare la reazione d'indotto, la curva della tensione sul collettore da una spazzola alla susseguente ecc.

Le principali prove di collaudo delle macchine sono:

1.° Prove di tensione con macchina a vuoto.

2.° Prove di tensione con carico normale in ampère.

3.° Prove di isolamento e di sovratensione.

4.° Prove di temperatura.

5.° Prove di rendimento.

6.° Prove di corto circuito (per i soli alternatori).

1.° *Prove delle macchine elettriche a vuoto.* — Previa una verifica con un galvanometro portabile se i due circuiti indotto e induttore non sono interrotti, la prova di una macchina a vuoto serve per constatare se la macchina dà tensione e se non vi sono difetti meccanici: riscaldamento dei cuscinetti, sfregamento dell'indotto contro l'induttore, vibrazioni moleste ecc. A questo riguardo ricordiamo:

1.° che la lubrificazione nei supporti ad anelli deve essere abbondante; l'olio, a mezzo di canaletti tracciati nelle bronzine, deve poter circolare su tutta la lunghezza delle medesime. Nelle grosse macchine l'olio dei supporti viene raffreddato a mezzo di serpentine d'olio in acqua o serpentine d'acqua immerse nell'olio.

2.° Tra gli indotti, sia delle dinamo che degli alternatori, e le espansioni polari vi deve essere uno spessore di interferro uguale ed uniforme. Ove vi fosse da un lato di una mac-

china un interferro minore (*girante eccentrica*) si creerebbe una forza di attrazione pregiudizievole pei supporti e una differenza forte di f. e. m. indotta negli elementi di avvolgimento e al collettore.

3.° La massa girante delle macchine elettriche deve essere *equilibrata* cioè non vi deve essere uno squilibrio di massa intorno all'asse di rotazione. Se la massa non è esattamente equilibrata si hanno nella marcia delle vibrazioni forti e moleste. Per riconoscere, nel dubbio, se *il rotore o girante* è equilibrato, bisogna levarlo dalla dinamo e posarlo coi perni su due coltelli taglienti a livello; si osserva se la girante stà in equilibrio o se si volta; in questo caso bisogna equilibrare la massa con dei contrappesi. L'equilibratura delle macchine ha molta importanza se esse sono molto veloci (1500-2500 giri).

4.° Trattandosi di dinamo si deve osservare se tra le spazzole ed il collettore vi sono scintille, nel qual caso si tenterà di limitarle spostando le spazzole sul collettore; adattandole bene al medesimo in modo che il contatto si estenda a tutta la superficie; allargandole o restringendole a seconda del bisogno. Le spazzole di carbone devono essere calcolate in modo che la sezione di appoggio corrisponda ad una media di 6-8 ampères per centimetro quadrato.

Nelle prove a vuoto si farà variare adagio adagio il regolatore del campo e si eleverà la tensione fino al massimo ed anche oltre il massimo, poichè è consentito generalmente fra costruttori e acquisitori che una macchina debba resistere anche se la tensione avesse a salire del 50% oltre il normale.

2.° *Prove di tensione con carico in ampère.* — Dopo la prova di una macchina a vuoto, la si mette in comunicazione col circuito esterno o meglio con una resistenza variabile adatta e nel mentre si eleva la tensione si regola la resistenza in modo da mantenere il carico in ampère massimo.

Le resistenze per consumare l'energia prodotta dalle dinamo o dagli alternatori nelle prove si fanno in diverso modo a seconda del valore della tensione. Per piccole dinamo od alternatori fino a 50 KW a bassa tensione si possono impiegare

delle botti o barili pieni d'acqua resa conduttrice con acido solforico o con bicarbonato di soda. Nelle botti si immergono due reofori o (tre se si tratta di corrente trifase) formati da striscie di lamiera di ferro applicate ad una traversa di legno.

Ma se la potenza delle macchine è grande e la tensione alta, i reofori di ferro si immergono in vasche d'acqua comune creando una circolazione poichè altrimenti l'acqua si scalda e bolle tumultuosamente. Nelle centrali idroelettriche si approfitta dell'acqua di scarico delle turbine. La distanza dei reofori è più o meno grande a seconda della tensione.

3.° *Prove di temperatura*. — Le prove di temperatura sono le più importanti di tutte perchè segnano il limite di potenza delle macchine elettriche. Il riscaldamento delle medesime è provocato dalle perdite interne e non deve superare certi limiti imposti dalla sicurezza di funzionamento e dalla buona conservazione degli isolanti.

Per rilevare la sopraelevazione di temperatura si fa funzionare la macchina da provarsi a pieno carico, adattando sopra gli avvolgimenti fissi o in punti opportuni dei termometri e si osserva quando la temperatura cessa di salire e rimane stazionaria. Allora si ferma la macchina e si applica rapidamente il termometro a mercurio sulle parti mobili ritenute più calde, aiutando l'assorbimento del calore con della stagnola avvolta sul bulbo del termometro e ricoprendo il tutto con bambagia. Per il ferro degli indotti degli alternatori e bronzine dei supporti si fanno dei fori e si immergono in essi i bulbi dei termometri. Contemporaneamente si legge la temperatura di altri termometri posti nell'ambiente, ma fuori dell'irraggiamento della macchina. Invece dei termometri si possono adoperare delle coppie termoelettriche.

La temperatura dei circuiti delle macchine si può rilevare anche con misura di resistenza. Si misura cioè la resistenza R_1 dei circuiti a freddo e la temperatura t_1 ambiente; poi si fa funzionare la macchina a pieno carico finchè la sovratemperatura è divenuta stazionaria.

Si misura allora la resistenza R_2 dello stesso circuito. La temperatura t_2 a caldo si desume colla formola:

$$t_2 = (234{,}5 + t_1)\frac{R_2}{R_1} - 234{,}5$$

(Il coefficiente 234,5 è l'inversa del coefficiente di temperatura del rame = 0,00426). Se durante il funzionamento della macchina la temperatura ambiente da t_1 fosse salita alquanto si farà la correzione di t_2.

Le misure col mezzo dei termometri o con il rilievo della resistenza non dànno la temperatura massima, poichè vi sono sempre dei punti interni dell'avvolgimento e coperti dai tubi isolanti dove certamente la temperatura è più alta. Sopratutto per gli alternatori il metodo di rilievo della temperatura colla misura della resistenza ohmica dà una media.

Conformemente alle prescrizioni studiate dalla Associazione Elettrotecnica Italiana d'accordo coi costruttori le temperature massime tollerabili per una buona conservazione degli isolanti delle macchine sono:

Isolanti con cotone impregnato 85.°

Isolanti di cotone, carta impregnata o nell'olio 95.°

Isolanti di mica, amianto, vetro, micanite 115.°

Avvolgimenti chiusi su se stessi: isolati 100°; non isolati 110°.

Collettori ed anelli 100°.

Per l'olio dei trasformatori è ammessa una temperatura massima di 90°. Per il metallo dei cuscinetti 80°.

Deducendo da questi valori la temperatura ambiente si ha la sopraelevazione cui devono soddisfare le parti delle macchine. Di solito si ritiene come temperatura massima d'ambiente 40°.

4.° *Prova dell'isolamento o di rigidità.* — Le prove di isolamento si fanno sulle macchine nuove o riparate e consistono nel sottoporre gli isolanti dei circuiti delle macchine a una forte tensione per un minuto per essere sicuri della loro rigidità o resistenza alla perforazione. La tensione di prova deve essere applicata gradatamente fra ciascun circuito elettrico e le altre parti metalliche (nuclei e carcasse di ferro) messe a terra. Le macchine si tengono ferme.

Secondo le prescrizioni italiane ed internazionali, chiamando E la tensione normale della macchina, la tensione per questa prova si tiene:

Per macchine elettriche superiori a 1 KW, trasformatori ecc. 2E + 1000. Per potenze inferiori a 1 KW: 2E + 500.

Induttori delle macchine sincrone (alternatori) a bassa tensione: da 2000 a 3500 volt e così pure i rotori dei motori a induzione.

5.° *Prove di sovravelocità.* — Tutte le macchine rotanti devono resistere e sopportare senza inconvenienti per un minuto eccessi di velocità del 25 % rispetto a quella di regime, o meglio la velocità di fuga delle turbine.

6.° *Prove di sovracorrente.* — Per gli alternatori si deve verificare che ad eccitazione normale possano portare per mezzo minuto, in corto circuito, una corrente quattro volte quella normale senza inconvenienti.

158. Rilievo del rendimento delle macchine elettriche. — Abbiam visto al parag. 144 quali sono le perdite di una dinamo e la definizione del rendimento. Gli stessi ragionamenti si possono applicare agli alternatori.

Ecco alcuni valori medi delle perdite percentuali nelle dinamo:

Perdite percentuali nelle macchine elettriche

Potenza in KW - per resistenza indotto (a) - per isteresi (b) - eccitazione (c) - meccaniche (d) - totali (e)

	(a)	*(b)*	*(c)*	*(d)*	*(e)*
1 a 5	10 a 7	5	6	2	20-23 %
4 a 50	6	3.5	4	1	14.5 »
50 a 100	4.5	3	2.75	0.5	10.75 »
100 a 300	4	2.5	2	0.4	8.9 »
300 a 500	3.5	2	1.40	0.3	7.2 »
500 a 1000	2	1.5	1.40	0.25	5.15 »

Per determinare il rendimento di una dinamo o di un alternatore si impiegano diversi metodi che distingueremo in *metodi diretti* e *metodi indiretti*. Coi primi si misura direttamente l'energia meccanica assorbita e l'energia resa. Coi secondi si mira a determinare il rendimento come motore o le perdite. Come è noto il rendimento è determinato dalla relazione.

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Potenza resa}}{\text{Potenza assorbita}} = \frac{\text{Potenza resa}}{\text{Potenza resa} + \text{Perdite}}$$

I metodi diretti si possono applicare per dinamo di limitata potenza e consistono:

1.° Nel misurare la potenza assorbita mediante un dinamometro di trasmissione a cinghie e l'energia resa con un buon wattmetro. Il metodo è di difficile impiego.

2.° Si può determinare il rendimento muovendo la dinamo o l'alternatore con un motore elettrico di pari forza separato, tarato in precedenza e cioè di cui si conosca l'esatto rendimento a diversi carichi. Anche questo sistema non è adoperato perchè esige un motore di pari potenza e uno sciupìo di corrente per le prove.

3.° Si può infine trovare il rendimento muovendo la dinamo con un motore elettrico (con accoppiamento diretto elastico) disposto sopra una specie di bilancia in modo che dallo spostamento di un indice si può sapere la coppia torcente necessaria per il movimento della dinamo da provarsi. (Figura 314).

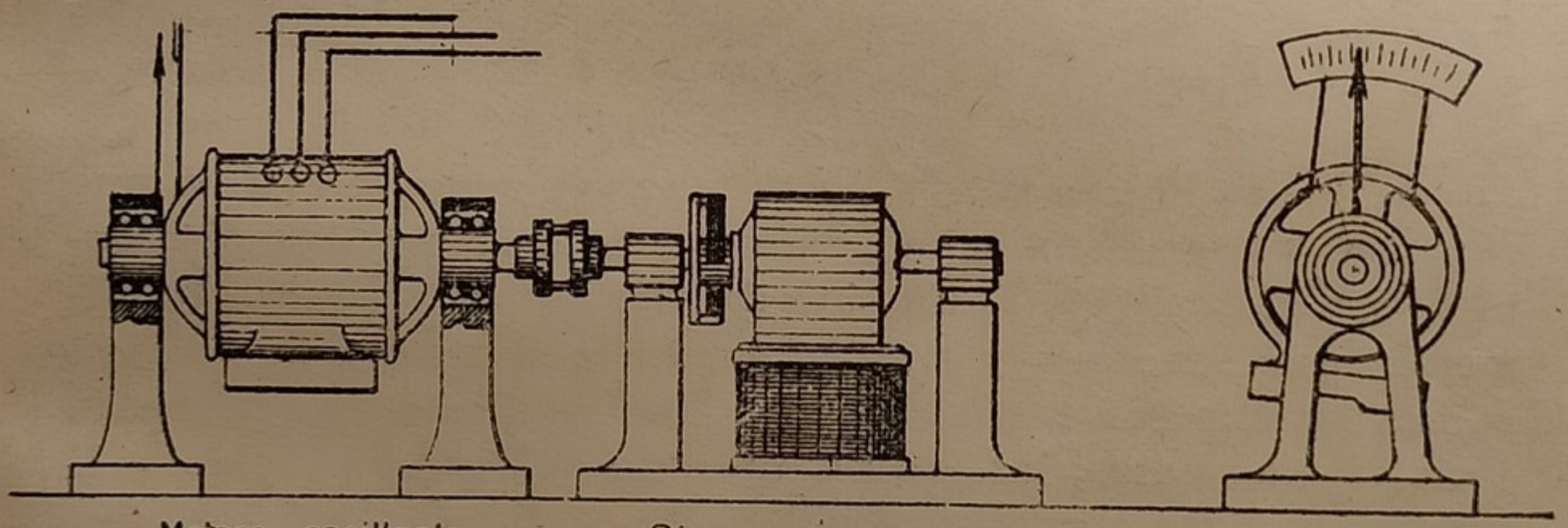


Fig. 314 - Cuplometro (misuratore della coppia).

Per questa esperienza il motore che aziona la dinamo può essere sostenuto a mezzo di anelli a sfere infilati sui due supporti sporgenti torniti. In questo modo il motore può oscillare liberamente dentro agli anelli, sostenuti a loro volta da due cavalletti fissi. La coppia che si sviluppa tra motore e dinamo farà spostare il primo di un certo angolo; la coppia in Kg-mt si può determinare mediante delle esperienze preparatorie oppure con un'asta orizzontale applicata al motore e con pesi come una bilancia.

Sia C la coppia corrispondente ad un dato spostamento angolare del motore oscillante; n il numero dei giri al 1"; la potenza trasmessa sarà data dalla formola:

$$C \frac{2 \pi n}{60} \quad \text{chilogrammetri a 1"}$$

oppure:

$$C \frac{2 \pi n}{60 \times 75} \quad \text{cavalli}$$

oppure:

$$C \frac{2 \pi n}{60 \times 75} 736 \quad \text{watt.}$$

Il metodo della misurazione della coppia con motore oscillante è molto preciso ma è applicabile solo a dinamo o alternatori di limitata potenza. (15 o 20 KW). La potenza resa dalla dinamo durante l'esperienza si misura con wattmetro.

Metodi indiretti. — I principali metodi indiretti di rilievo delle perdite di una dinamo e che sono quelli più impiegati sono:

1.° *Prova di una dinamo come motore a vuoto.* — Con una corrente presa da un'altra dinamo o da una batteria di accumulatori si fa girare la dinamo di cui si vuol trovare il rendimento, come motore, ma senza carico, e si misura la potenza con un wattmetro e la tensione e l'intensità con un voltmetro e un amperometro, inseriti nel circuito dell'indotto, quando il numero dei giri è quello normale. (Fig. 315). Inoltre si misura la intensità e f. e. m. assorbita dal circuito di eccitazione.

L'energia consumata dall'indotto nella marcia a vuoto, ossia senza carico meccanico sul motore e con tensione normale, rappresenterà le perdite meccaniche (attrito e ventilazione) e quelle magnetiche di isteresi e correnti di Foucault nell'indotto. In questa esperienza si può far variare la tensione E di alimentazione e la corrente di eccitazione in modo da mantenere costante il numero dei giri.

Si nota per ciascun valore di E la potenza W consumata dal motore e si portano in curva, mettendo E sulle ascisse e W sulle ordinate. Prolungando la curva ad occhio fino ad in-

contrare l'asse delle ordinate nel punto A, l'ordinata OA rappresenterà le perdite meccaniche. Così si possono dividere queste perdite da quelle magnetiche.

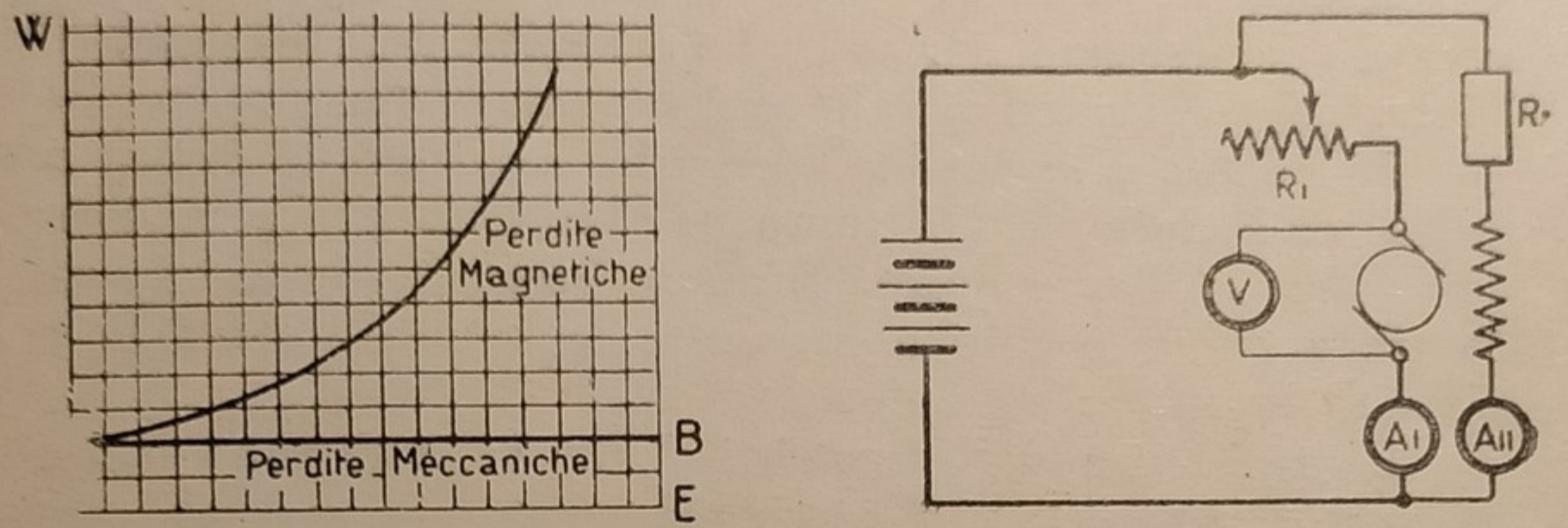


Fig. 315 - Schemi relativi alle prove di rendimento delle dinamo.

Per completare le perdite bisogna aggiungere quelle elettriche nell'indotto e di eccitazione; ora queste non si possono valutare se non col calcolo, ossia colla formola RI^2, e previa conoscenza della resistenza ohmica dei circuiti indotto e induttore e delle intensità massime di regime nell'indotto e nell'induttore.

Nei calcoli si deve riferire il rendimento allo stato di macchina calda e dopo lungo funzionamento. Perciò le resistenze dei circuiti indotto e induttore che si rilevano a macchine fredde devono essere aumentate e riportate a 85° C. che è la massima temperatura tollerabile per la buona conservazione. Perciò si adopera la formola del parag. 25.

Conoscendosi le perdite si calcola il rendimento colla solita formola data in principio del presente paragrafo.

2.° *Prova con motore ausiliario.* — Il sistema più impiegato per la verifica del rendimento delle dinamo e degli alternatori di media e di grande potenza consiste nell'azionare la macchina da provare a mezzo cinghia con un piccolo motore di cui si conosca l'esatto rendimento a diversi carichi. Nel circuito di alimentazione del motore si inserisce un wattmetro; si preferisce che il motore sia a corrente continua per la possibilità di poter aggiustare in modo preciso la velocità della grande macchina da provare.

Si comincia a far girare la macchina alla sua velocità normale senza eccitazione. La potenza assorbita dal motore depurata dalle perdite proprie del motore stesso e della cinghia darà le perdite meccaniche.

Allora si eccita la macchina finchè a velocità normale essa dà la tensione normale. La maggior potenza netta del motorino corrisponderà alle perdite magnetiche.

In quanto alle perdite elettriche esse devono essere calcolate colla formola RI^2 tanto per l'indotto che per l'induttore. Per applicare questa formola bisogna rilevare la resistenza dei due circuiti e conoscere le intensità massime del circuito induttore ed indotto.

La resistenza del circuito indotto della dinamo o degli alternatori essendo molto piccola si misura con corrente continua; la caduta di tensione con un millivoltmetro o un voltmetro di 5 o 10 volt. Per la resistenza del circuito induttore si può adoperare lo stesso metodo oppure quello del ponte di Wheastone.

I valori di R tanto del circuito induttore che indotto si devono riportare alla temperatura di 85° colla formola del paragrafo 157.

Il rendimento che si ottiene coi metodi indiretti ossia mediante valutazione delle perdite si dice *convenzionale*. Esso è minore alquanto del rendimento effettivo nella misura di $^1/_2$ a 1 per cento.

La causa è dovuta al fatto che vi sono delle *perdite addizionali* difficilmente valutabili col calcolo e che si formano soltanto quando gli indotti delle macchine sono percorsi dalla corrente normale alla tensione pure normale. Fra le perdite addizionali vi sono ad esempio: quelle dovute allo skin effect, alle correnti di Foucault nei conduttori.

Le perdite addizionali di alternatori si possono misurare in gran parte, con un wattmetro quando funzionano in corto circuito, e deducendo naturalmente le perdite meccaniche e nel rame.

CAPITOLO X.

Trasformatori.

159. Trasformatori per corrente alternata. — Questi apparecchi servono a trasformare la corrente alternata da alta a bassa tensione o viceversa e la loro costruzione si appoggia sul terzo fenomeno della induzione elettromagnetica fra due serie di spirali (parag. 67) avvolti sullo stesso nucleo di ferro. Per conseguenza ogni trasformatore è costituito: 1.° da un *circuito induttore o primario* che riceve la corrente da un generatore a corrente alternata; 2.° da un *circuito indotto o secondario* che fornisce la corrente a degli apparecchi utilizzatori; 3.° da un *nucleo di ferro lamellare* formante un circuito magnetico chiuso nel quale si forma un flusso magnetico alternativo, risultante dalla azione della corrente primaria e secondaria.

I trasformatori per corrente alternata si dicono *statici* (cioè fermi), poichè in essi non vi è nessun organo meccanico in movimento; ciò che in essi effettivamente si muove, senza che appaia ai nostri sensi, è il flusso magnetico, che è alternativo e produce l'effetto d'induzione.

I trasformatori hanno una grande importanza industriale poichè grazie alle loro qualità è stato possibile l'utilizzazione della corrente alternata per trasmettere l'energia ad enormi distanze. La trasmissione di grandi quantità di energia dagli impianti idroelettrici nelle montagne ai lontani centri industriali è subordinata alla condizione di poter impiegare piccole intensità sotto grandissime tensioni. Ora senza l'in-

venzione dei trasformatori ciò non sarebbe stato possibile, poichè cogli alternatori e colle dinamo non si possono generare che correnti a limitate tensioni. Coi trasformatori è possibile di elevare queste tensioni, riducendo in proporzione inversa l'intensità, e di ritrasformarle poi nei centri di consumo ad una tensione limitatissima e inoffensiva. Un altro pregio dei trasformatori oltre ai già accennati è quello di possedere un altissimo rendimento di cui non si ha esempio in nessuna altra macchina. Esso varia da 0,94 a 0,98.

Si dice *rapporto di trasformazione* il rapporto fra la tensione di alimentazione o primaria e quella di utilizzazione o secondaria quando il trasformatore funziona a vuoto. Così se un trasformatore trasforma la tensione da 5000 Volt a 100 Volt, il rapporto di trasformazione sarà 5000 : 100 ossia 50. Essendo a pieno carico il rendimento vicino al cento per cento lo stesso rapporto indica in senso inverso quello delle intensità in ampères. Così se nel trasformatore sopra accennato l'intensità nel primario è di 5 ampères nel secondario sarà di $50 \times 5 = 250$ amp. di modo che l'energia apparente sarà:

al primario 5000 V. e 5 A. ossia 25000 volt-ampere;

al secondario 100 V. e 250 A. ossia 25000 volt-ampère.

Ossia si ha con grande approssimazione:

$$E_1 \times I_1 = E_2 \times I_2$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Cioè le f. e. m. stanno fra loro in rapporto inverso della intensità.

160. Forza elettromotrice nei trasformatori. — Nei trasformatori perfetti cioè in quelli dove non vi è nessuna dispersione di flusso i due avvolgimenti primario e secondario sono avvolti in modo da abbracciare lo stesso ed unico flusso che si forma nel nucleo di ferro. Potremmo quindi ripetere lo stesso ragionamento che abbiamo fatto al parag. 83 sulla f. e. m. che si genera negli avvolgimenti a spirale abbraccianti un flusso magnetico alternativo tanto per il primario che per il secondario.

Si ha infatti indicando con N_1 e N_2 le spire:

$$E_1 = 4.44\ N_1\ f\ \Phi m\ 10^{-8}$$
$$E_2 = 4.44\ N_2\ f\ \Phi m\ 10^{-8} \qquad (1)$$

dove E_1 ed E_2 sono le tensioni primaria e secondaria; f la frequenza; Φm il flusso magnetico massimo in un periodo, che si ritiene comune tanto al primario che al secondario.

Dividendo fra loro le due equazioni si ha:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \text{ e perciò anche } \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \text{costante}$$

dalle quali si cava:

$$E_1 = \frac{N_1}{N_2} E_2 \quad \text{e} \quad I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1$$

cioè le f. e. m. primaria e secondaria si mantengono fra loro nel rapporto del numero delle spire d'avvolgimento.

Le due formole (1) servono a calcolare il numero delle spire e la sezione del ferro del nucleo dei trasformatori data la tensione e la frequenza. Generalmente il flusso Φm si calcola ammettendo che l'induzione B nel ferro può essere fra 6000 e 13000 linee per cmq. Essendo $\Phi m = SB$ dove S è la sezione in cmq. si può determinare il valore del flusso; poi con una delle formole (1) il numero delle spire. Si possono fare diversi tentativi finchè si è trovato la soluzione più conveniente. Altri criteri per la costruzione saranno esposti nei paragrafi successivi.

Le f. e. m. E_1 ed E_2 rappresentano esattamente le tensioni ai morsetti primari e secondari solo quando il trasformatore funziona a vuoto. Ma se esso porta un carico in ampère al secondario allora una piccola parte della f. e. m. come in tutti i circuiti indotti di macchine, viene assorbita dalla resistenza ohmica dei conduttori e dal lavoro di isteresi e delle correnti di Foucault. La differenza è però molto piccola e varia in generale da 1,5 a 3 per cento dai grossi ai piccoli trasformatori.

ESEMPIO. — Si domanda quale è il flusso magnetico e l'induzione B nel nucleo di un trasformatore monofase che ha la tensione primaria di 5000 volt, 500 spire sul primario e la frequenza 50. Sarà:

$$5000 = 4.44 \times 500 \times 50 \times \Phi m \ 10^{-8}$$

$$0.045 = \Phi m \ 10^{-8} \quad \text{ossia} \quad \Phi m = 0.045 \times 10^{8} = 4500000$$

Supposto che la sezione del ferro sia di 450 cmq. l'induzione per cmq. sarà:

$$B = 450000 : 450 = 10000$$

Nelle formole (1) entrano 4 incognite; nel caso di costruzione di nuovi trasformatori in generale è data la tensione E_1 **ed** E_2 **e la frequenza; restano a fissarsi il numero delle spire ed il flusso e per esso la induzione massima B nel ferro e la sezione S del nucleo. Se si mantiene alto il valore di Φ si possono mettere minori spirali. Viceversa se si tiene piccolo Φ bisogna aumentare le spire e quindi il peso di rame. A parità di flusso magnetico se si eleva B, aumentano le perdite per isteresi in ragione di circa il quadrato di B e la curva della f. e. m. ed intensità si deforma dalla sinusoide.**

Il numero delle spire lo si calcola da 5 a 6 volt per ogni spira, fino a 20 volt per spira; ma la determinazione esatta delle spire e della sezione e delle dimensioni dei nuclei deve essere fatta per tentativi collo scopo di ottenere col minimo peso o col minimo costo di ferro e di rame una superficie raffreddante capace di smaltire il calore creato dalle perdite interne del trasformatore (effetto Joule, isteresi, ecc.) ad una temperatura tale da non compromettere la durata degli isolanti. Tale temperatura è fissata di 80° per i fili ricoperti con rivestimenti tessili e per gli isolanti ordinari di cartone, e 85° se i fili sono immersi nell'olio.

161. Funzionamento dei trasformatori. — I fenomeni che si compiono in un trasformatore sono piuttosto complessi perchè parecchi sono gli elementi che possono influenzare l'andamento: le tensioni primarie e secondarie e le correnti rispettive; la f. e. m. di selfinduzione; le perdite ohmiche e di isteresi; le dispersioni di flusso, ecc. Per semplificare alquanto l'analisi dei fenomeni, supporremo in un primo tempo di aver un trasformatore idealmente perfetto, cioè senza resistenza

ohmica nei circuiti interni, senza perdite per isteresi e correnti di Foucault e senza dispersioni di flusso. Perciò alcune delle *proposizioni* o postulati che andremo fissando e spiegando non sono da ritenersi assolutamente esatte ma però assai prossime al vero.

1.° *Nei trasformatori le tensioni ai morsetti primario e secondario, sono in opposizione fra loro.* (Fig. 315). Infatti nei nuclei dei trasformatori il flusso magnetico non può essere che *unico* e cioè risultante delle correnti primaria e secondaria. Perciò le due f. e. m. dovranno avere la stessa fase; ma la tensione ai morsetti primari dovrà essere tale da equilibrare la f. e. m. primaria e cioè dovrà essere di segno contrario.

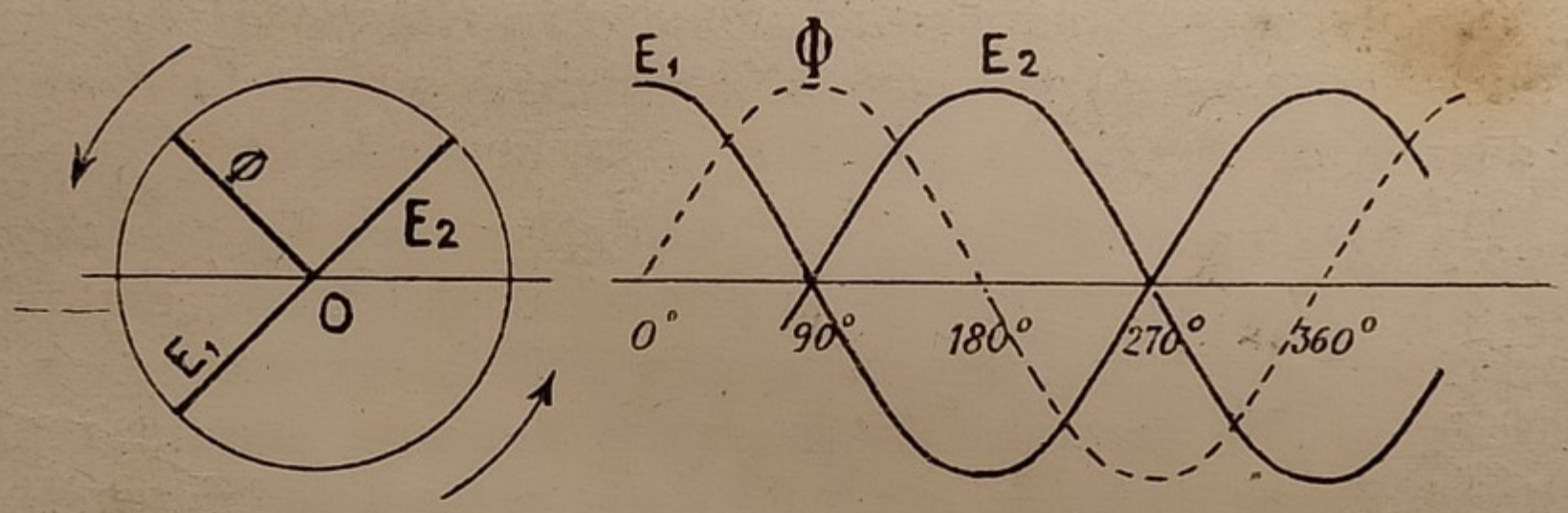


Fig. 315 - Tensioni e flusso in un trasformatore.

In altri termini i vettori che rappresentano le due tensioni saranno l'uno sul prolungamento dell'altro e le due sinusoidi opposte l'una all'altra come è indicato dalla fig. 316.

2.° *Nei trasformatori la f. e. m. secondaria è in ritardo di* 90° *ossia di un quarto di periodo rispetto al flusso* Φ *e la f. e. m. primaria in anticipo di* 90°. Ricordiamo che quando un flusso magnetico alternativo agisce nell'interno di una spirale vi crea una f. e. m. indotta e che questa ha il suo valore massimo nell'istante in cui il flusso ha la sua massima velocità di variazione ossia quando passa per lo zero e si inverte; ed ha il suo valore zero quando il flusso passa per il valore massimo e da crescente diventa decrescente. Perciò la f. e. m. indotta nel secondario sarà in ritardo di 90° rispetto al flusso; ovverosia anche: la tensione ai morsetti primari è in avanzo di 90° rispetto al flusso. Ciò equivale a dire che il flusso è in

avanzo sulla f. e. m. secondaria e in ritardo rispetto alla primaria.

3.° *Il flusso magnetico è in fase colla corrente magnetizzante.* I due circuiti di ogni trasformatore sono *induttivi* cioè produttori di flussi magnetici. Ora noi ricordiamo che in tutti i circuiti induttivi (parag. 179) la corrente alternata è in ritardo di fase rispetto alla tensione applicata di un certo angolo φ e che questa corrente è risultante di due correnti componenti: l'una in fase colla f. e. m. applicata e che si dice *corrente attiva* perchè è quella che rappresenta la vera energia del circuito e crea, diremo così, i watt; l'altra in ritardo di 90° rispetto alla prima e che rappresenta una corrente inattiva (svattata) e che si dice *corrente di magnetizzazione.*

La corrente di magnetizzazione è in ritardo di 90° (come il flusso magnetico) *rispetto alla tensione primaria e quindi in avanzo di* 90° *rispetto alla f. e. m. secondaria.* (Fig. 315).

Da queste considerazioni ne deriva una importante e cioè essendo nelle ordinarie applicazioni dei trasformatori la tensione primaria mantenuta costante, il flusso magnetico che dà origine alle tensioni dovrà essere costante e quindi pure *costante dovrà essere la intensità della corrente di magnetizzazione* comunque abbia a variare il carico del trasformatore. In ogni caso la corrente di magnetizzazione (quando il ferro non sia saturo o prossimo alla saturazione) è proporzionale alla tensione primaria.

La corrente di magnetizzazione i_0 si calcola colla formola al parag. 82 mettendo (pag. 201):

1.° per N il valore di N_1 o di N_2 a seconda che si vuol riferire la corrente stessa al primario o al secondario.

2.° per B il valore di Φm diviso per la sezione del nucleo di ferro.

3.° per l la lunghezza in cm. del circuito magnetico (lunghezza sviluppata del nucleo)

4° per δ il prodotto dei giunti piani per 0,005.

5.° per μ la permeabilità calcolata colle tabelle e formole relative al parag. 84 o tabelle parag. 61.

4.° *La corrente primaria in un trasformatore funzionante a vuoto è risultante della corrente di magnetizzazione e della corrente attiva rappresentante le perdite per isteresi, effetto Joule, correnti di Foucault.*

Quando il circuito primario è connesso alla linea di alimentazione, mentre *il secondario è aperto*, la potenza consumata dal circuito primario serve unicamente per creare il magnetismo del nucleo ed a sopperire alle perdite di isteresi nel nucleo e all'effetto Joule nel primario. Nulla vien dato al circuito secondario essendo aperto.

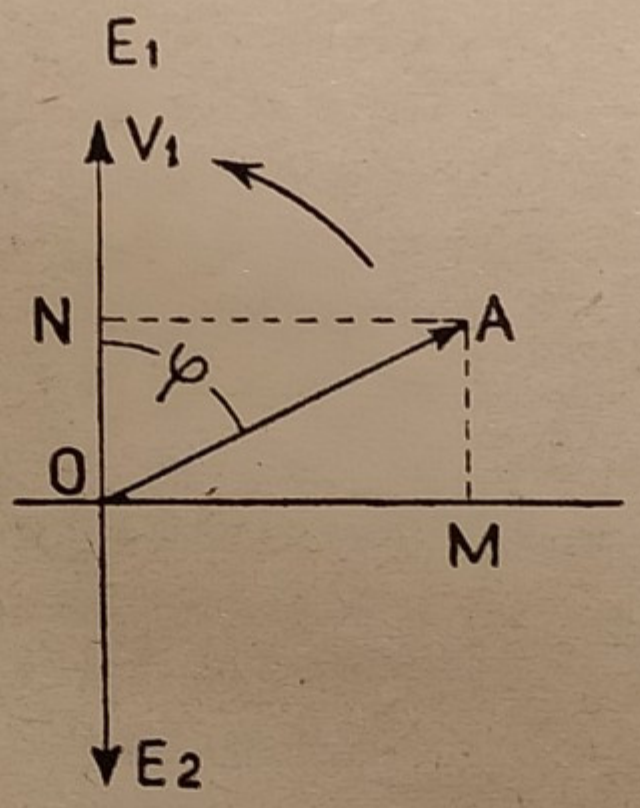
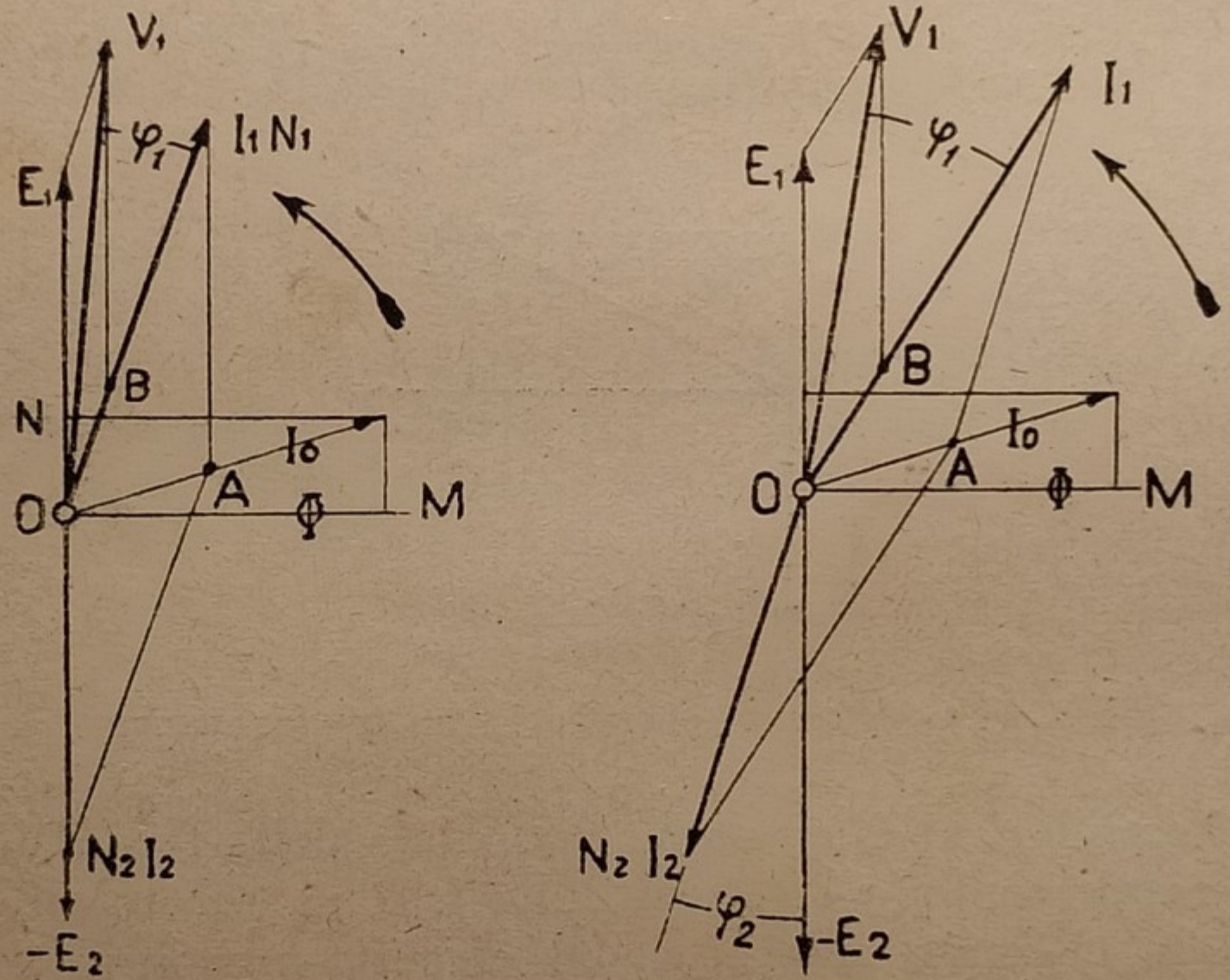


Fig. 316 - Corrente a vuoto in un trasformatore.

Riferendosi al diagramma vettoriale della fig. 316 se OE_2 e OE_1 rappresentano i vettori delle f. e. m. secondaria e primaria, la corrente assorbita dal circuito primario a vuoto sarà rappresentata da un vettore OA. La proiezione ON di questo vettore sull'asse di OE_1 rappresenta in lunghezza e direzione la corrente attiva (steresi, effetto Joule, ecc.). La proiezione OM perpendicolare a OE_1 ci darà la corrente magnetizzante. La corrente OA è misurabile con un amperometro; la componente attiva ON si può desumere dalle indicazioni di un wattmetro inserito dividendo i watt per la tensione V_1 applicata. La corrente OA varia nei trasformatori dal 3 al 4% della intensità normale primaria. Praticamente si può ritenere la corrente OM uguale a OA, cioè alla corrente primaria che si legge in un amperometro inserito, quando il trasformatore lavora a vuoto.

5.° *Man mano che cresce il carico in ampère nel circuito secondario, si sviluppa nel primario una corrente proporzionale e (con molta approssimazione) avente lo stesso spostamento di fase della secondaria.* Per spiegare questa specie di regolazione automatica della corrente nel primario e nel secondario occorre di riferirsi ai diagrammi vettoriali delle fig. 317 e 318. Nella prima la corrente I_2 nel secondario è in fase colla f. e. m. E_2 (carico non induttivo); nella seconda figura la corrente I_2 è in ritardo nell'angolo φ_2 rispetto alla f. e. m. E_2 (carico induttivo).



Figg. 317 - 318 - Diagrammi vettoriali in un trasformatore con carico non induttivo e con carico induttivo.

Per spiegare i diagrammi occorre premettere che il flusso magnetico del nucleo (p. e. di un trasformatore monofase) è risultante dalle due forze magnetomotrici (ampère-spire) del primario e del secondario. *Se la tensione primaria si mantiene costante il flusso magnetico rimane pure costante* e, come si è dimostrato, in quadratura (90°) colle f. e. m. primaria e secondaria.

Siano OIo e OM la corrente totale e la componente di magnetizzazione quando il trasformatore funziona a vuoto e sia

OA, in una scala determinata, una lunghezza proporzionale alle ampère-spire magnetizzanti o di eccitazione nel flusso.

Sia O — N_2 I_2 un segmento rappresentante le amp-spire di eccitazione nel secondario. Se l'eccitazione del campo OA deve rimanere costante, onde mantenere il flusso costante, il tratto OA rimarrà fisso ed essendo esso risultante delle forze magnetomotrici ossia delle ampère-spire primarie e secondarie basterà completare il parallelogrammo per avere in grandezza e posizione le due componenti.

Perciò si congiunge A con N_2 I_2; da A si eleva una parallela a N_2 I_2 - O; da O si tira una parallela A N_2 I_2. La componente OI_1 rappresenterà in grandezza e direzione la forza magneto-motrice o ampère spire nel primario, ossia la OI_1 darà la direzione del vettore della corrente primaria. Questa corrente darà luogo ad una caduta di tensione OB (per effetto Joule). Allora la tensione ai morsetti V_1 dovrà essere risultante della OB e della f. e. m. OE_1 calcolata colla formola al parag. 160 e in opposizione alla tensione secondaria E_2. Completiamo il parallelogramma sui lati OB e OE_1; la diagonale OV_1 rappresenterà in lunghezza e direzione il vettore della tensione applicata ai morsetti primari.

Il vettore della corrente primaria OI_1 rimane in ritardo dell'angolo φ_1 rispetto alla tensione V_1.

Praticamente la caduta di tensione per effetto Joule è estremamente piccola (0,5-1 per cento) rispetto alla f. e. m. E_1 o E_2 perciò φ_1 nella prima figura diventa quasi nullo quando il trasformatore lavora a pieno carico e la corrente secondaria è in fase colla f. e. m. E_2. Quando il carico è induttivo, se OA è molto piccolo, il vettore OI_1 riesce sul prolungamento di OI_2 e quindi φ_1 riesce uguale a φ_2. Si nota altresì che le amp-spire primarie OI_1 sono maggiori delle amp-spire secondarie ON_2 I_2 sia pure di poco.

162. Effetto della dispersione di flusso. — Finora abbiam supposto che nel nucleo vi sia un flusso unico attraversante le bobine primarie e secondarie e che promana dal primario. Ciò è perfettamente vero quando il trasformatore funziona a vuoto cioè col secondario aperto. Ma quando il primario ed il secondario sono in carico, cioè percorsi da

corrente, essendo le due correnti in opposizione o quasi, esse tendono a creare due *flussi magnetici in opposizione.*

Suppongasi ad esempio, di avere un trasformatore con nucleo rettangolare con il circuito primario sopra una colonna ed il secondario sull'altra. (Fig. 319). Quando il secondario è

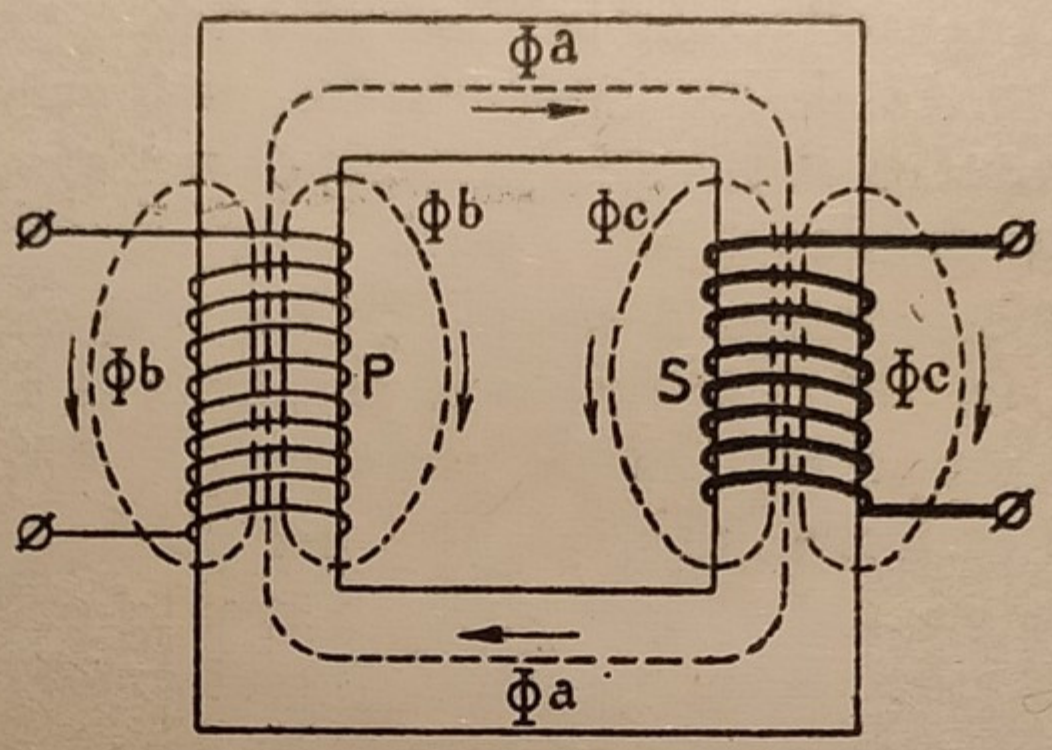


Fig. 320 - Flusso di dispersione nei trasformatori.

aperto si formerà nel nucleo un unico flusso Φ_a; quando invece il secondario è chiuso le correnti formeranno il flusso Φ_a e inoltre due flussi di dispersione Φ_b Φ_c in opposizione che uscendo dai nuclei si chiudono nell'aria. Nel nucleo del secondario S vi sarà un flusso minore che in quello del primario, e la differenza sarà tanto più grande quanto più grandi saranno le correnti in P e in S. Perciò le tensioni saranno anche più differenti.

La presenza dei flussi di fuga o di dispersione equivale alla introduzione nei due circuiti del trasformatore di induttanze.

Gli effetti delle dispersioni di flusso sono due:

1.° Il rapporto $V_1 : V_2$ non rimane costante (come si ritiene di solito); la tensione V_2 va abbassandosi coll'aumentare degli ampères, cioè si ha una forte caduta di tensione da carico zero a carico massimo.

2.° I flussi di dispersione rappresentano campi magnetici non neutralizzati e dànno luogo nei rispettivi circuiti a maggiori f. e. m. di selfinduzione e perciò a sfasamenti tra correnti e tensioni.

Ad evitare questi effetti nocivi dei flussi di dispersione occorre che i circuiti primari e secondari siano avvolti l'uno sull'altro oppure in matasse alternate primarie e secondarie, cercando di lasciare il minimo spazio possibile fra i due avvolgimenti. Con questi ed altri accorgimenti i flussi di dispersione sono ridotti nei moderni trasformatori a valori assai piccoli (1-2% del flusso principale).

163. Caduta di tensione dei trasformatori da carico zero a carico massimo — Crescendo le correnti primaria e secondaria di un trasformatore I_1 e I_2 la tensione secondaria si abbassa benchè al primario la tensione venga mantenuta costante. Cioè il rapporto di trasformazione delle tensioni a carico zero non è uguale esattamente al rapporto sotto pieno carico. La differenza fra la tensione E_2 quando nel secondario la corrente è zero e la tensione V_2 quando il secondario è percorso da una corrente I_2 si dice *caduta di tensione* e si esprime in una percentuale della tensione di regime. La *caduta di tensione* varia dai piccoli ai grandi trasformatori dal 5 al 1%. La caduta di tensione si misura altresì come differenza fra la tensione V_1 e V_2 qualora il rapporto di trasformazione fosse ridotto a uno. La riduzione all'unità del rapporto di trasformazione semplifica e rende più evidente l'analisi vettoriale dei diversi elementi di un trasformatore. Per ridurre ad uno il rapporto di trasformazione di un trasformatore qualsiasi bisogna moltiplicare la tensione primaria per $\frac{N_2}{N_1}$ (o dividere la secondaria per $\frac{N_1}{N_2}$; così bisogna moltiplicare la intensità primaria per $\frac{N_1}{N_2}$. Infine per ridurre la resistenza del circuito primario a quella del secondario si moltiplica la prima per $(N_2 : N_1)^2$.

E' evidente che la caduta di tensione è dovuta alla somma geometrica dei seguenti vettori:

1.° della perdita ohmica nel circuito secondario, in fase con I_2.

2.° della perdita ohmica nel circuito primario in fase con I_1.

3.° della f. e. m. di autoinduzione a 90° con I_2 del secondario.

4.° della f. e. m. di autoinduzione pure a 90° con I_1 nel primario.

Ora se il rapporto di trasformazione è ridotto all'unità, le cadute ohmiche nei due circuiti essendo in fase con I_1 e I_2 ed essendo questi vettori praticamente nella medesima direzione esse si possono sommare aritmeticamente. Lo stesso si può dire delle cadute induttive o f. e. m. di selfinduzione le quali sono a 90° con I_1 e I_2.

Tutto ciò premesso ecco il diagramma vettoriale che si usa di fare nelle prove dei trasformatori per trovare la caduta di tensione. Il diagramma è riferito alla tensione secondaria e con rapporto di trasformazione ridotto all'unità.

Fissata la scala delle tensioni sia OA (fig. 320) il vettore della V_2 ai morsetti del secondario sfasato dell'angolo φ_2 colla corrente I_2 in ritardo. Da A si conduca la parallela AB ad OI_2 di lunghezza:

$$R_2\ I_2 + R_1\ I_1 \frac{N_2}{N_1}$$

che rappresenta la somma delle perdite di tensione ohmiche nei due circuiti del trasformatore.

Dal punto B si innalzi una perpendicolare BC a OI_2 di lunghezza:

$$e_{s2} + e_{s1} \frac{N_2}{N_1}$$

che rappresenta la somma delle perdite induttive sfasate a 90° colla corrente I_2.

La ipotenusa AC rappresenterà la risultante ossia la caduta totale di tensione e la OC rappresenterà in grandezza e direzione la tensione al primario (rapportata al secondario) L'effettiva tensione primaria si ottiene moltiplicando OC per

$$\frac{N_1}{N_2}$$

Volendo fare il diagramma delle intensità (riferite ancora al secondario) si procede in modo analogo. Si conduce una parallela MN al vettore OA pari in lunghezza alla inten-

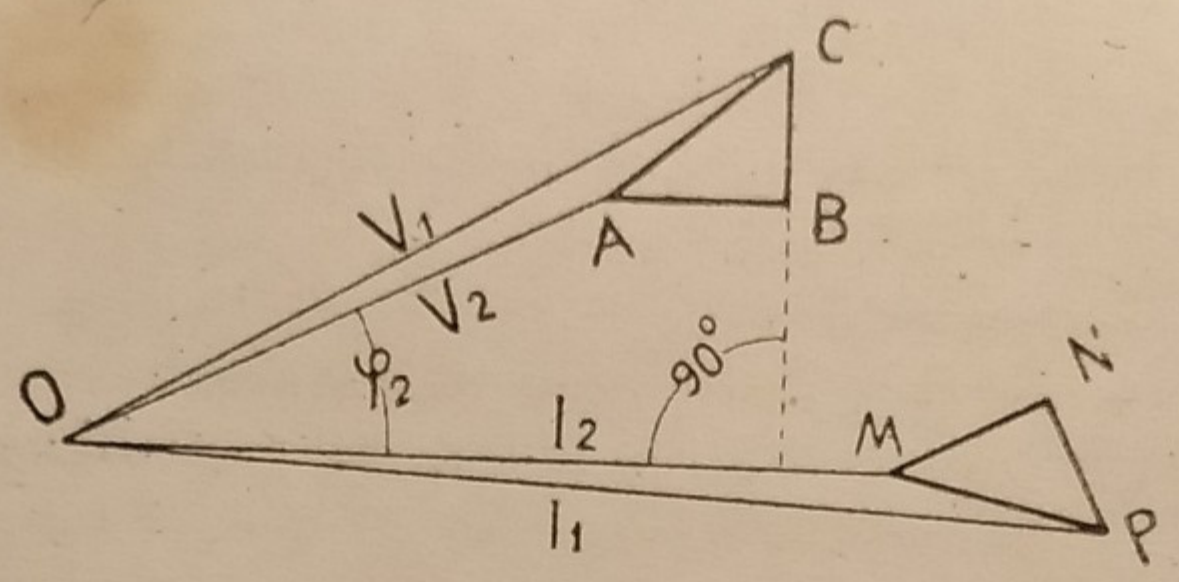


Fig. 320 - Diagramma delle cadute di tensione e delle intensità.

sità che assorbe il trasformatore per le perdite di isteresi. Poi si conduce la perpendicolare NP rappresentante la corrente Io di magnetizzazione; MP diventa risultante e la OP la corrente totale primaria rapportata al secondario.

La *caduta di tensione* è data dalla differenza OC — OA, e l'incremento di intensità dalla differenza OP - OM.

Il diagramma ripetuto per valori diversi di φ_2 sia in ritardo che in anticipo da tutti i valori della caduta di tensione nelle condizioni diverse di carico che si desiderano.

Resta ora da determinare praticamente i valori di AB, BC ecc. Notiamo anzitutto che se mettiamo in corto circuito il trasformatore sul secondario AC rappresenta la caduta di tensione. Si usa infatti di rilevare la caduta di tensione comprensiva della caduta ohmica ed induttiva colla seguente esperienza:

Si chiude il secondario in corto circuito inserendo un amperometro e si adatta ai morsetti del primario un voltmetro e un wattmetro. Colla corrente presa da un alternatore o servendosi di adatte resistenze si eleva la tensione al primario finchè l'amperometro inserito sul secondario segna la corrente I_2 o di regime. In queste condizioni la tensione segnata dal voltmetro sul primario da, riferita al primario, la ipotenusa AC della fig. 320. Il wattmetro segna la potenza attiva dovuta alle perdite per resistenza ohmica dei due circuiti. Indicando con Vo la tensione segnata dal voltmetro e W la potenza segnata dal wattmetro sarà:

$$W = V_0 I_1 \cos \varphi_0$$

dalla quale relazione possiamo cavare il valore di φ_0, ossia dell'angolo CAB e quindi costruire il triangoletto ABC riferito al prim.° Per riferirlo al secondario si moltiplicano i valori dei cateti per il fattore N_2/N_1.

Il triangolo ABC mantiene le sue dimensioni costanti al variare di φ_2 ; esso ruota intorno al punto A.

Il diagramma di Kapp del paragrafo seguente da appunto in modo evidente le variazioni della caduta di tensione al variare di φ_2.

164. Diaframma circolare di Kapp. — Il diagramma di Kapp dà in modo facile ed evidente le cadute di tensione per un determinato carico I_2 al variare di φ_2 e supposto costante la tensione primaria V_1 (ridotta al sec.° - rapporto unitario).

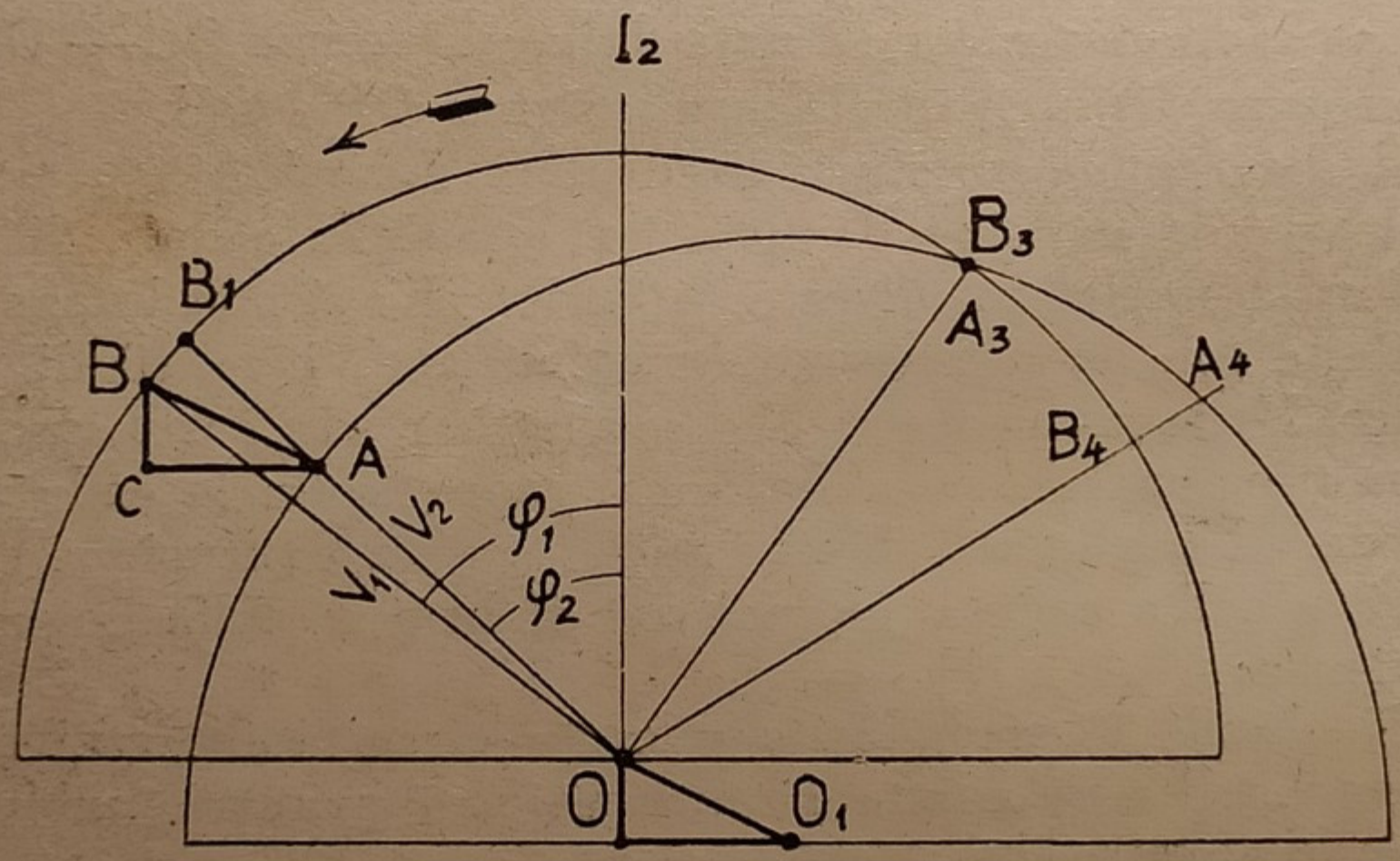


Fig. 321 - Diagramma di Kapp

Sia OI_2 la direzione del vettore dell'intensità second. (Fig. 321) e OA la tensione second. sfasata dell'angolo φ_2. Tracciamo come al parag. precedente il triangolo ABC in cui AC è dato dalla somma delle perdite induttive, BC dalla somma delle perdite ohmiche, e che si ottengono colla esperienza del corto circuito indicata nel paragrafo precedente. Sarà AC perpendicolare a OI_2 e BC parallelo. Il vettore OB rappresenterà in grandezza e direzione la tensione prim. ridotta alla secondaria. Se la tensione primaria è costante il luogo dei punti B è un

cerchio col centro O e raggio OB. La caduta di tensione è data dalla differenza OB-OA o con molta approssimazione dal segmento AB_1.

Ripetendo questa costruzione per diversi valori di φ_2; il triangoletto ABC si sposta parallelamente a sè stesso ed il luogo dei punti A è dato da una circonferenza che ha il raggio O_1 A essendo O_1 ottenuto dal riporto del triangolo ABC verso il centro.

Determinati così i due semicerchi sta la regola: che qualunque raggio da O sfasato di φ_2 rispetto a I_2 interseca fra i due cerchi un segmento AB_1 che da il valore della caduta di tensione.

Dal diagramma si rileva che diminuendo φ_2 la caduta di tensione si riduce e vi è un valore di φ_2 in anticipo con vettore OA_3 per cui corrisponde una caduta di tensione zero. Anticipando ancora φ_2 invece di una caduta si ha un aumento di tensione. Conseguenza di ciò è che quando un trasformatore alimenta al secondario dei cavi sotterranei a lunghe linee ad altissima tensione aventi tutte una grande capacità *la tensione al secondario si eleva col carico invece che diminuire.*

165. Perdite di potenza nei trasformatori. — Nell'esercizio dei trasformatori si verificano delle perdite interne dovute all'effetto Joule nei due circuiti, nell'isteresi e correnti di Foucault nel nucleo e nei pezzi di collegamento (tiranti, staffe, bulloni, ecc.) Le perdite per effetto Joule crescono in ragione del quadrato della intensità; le perdite per isteresi dipendono oltre che dal valore della induzione B, dalla frequenza.

Per avere una idea del rendimento e delle perdite nel ferro, nei trasformatori a 42-50 periodi: ecco alcuni dati:

Potenza in Kw.	Rendimento p. %	Perdite nel ferro in watt.
1	93 - 94	40 - 60
2	94 - 95,5	110 - 140
10	95,5 - 96,5	170 - 220
50	97, - 98,	100 - 700
250	97,5 - 98,2	1500 - 2000
500	98,4 - 98,7	3000 - 4000
1000	98,5 - 98,8	6000 - 5000
2000	98,7 - 99	9000 - 13000

Si costruiscono trasformatori anche con consumo ridotto nel ferro a circa la metà e ciò per i casi in cui i trasformatori devono rimanere continuamente in servizio e in cui l'energia si paga a contatore. Poichè se il trasformatore è a perdita ridotta alla metà nel ferro, il consumo annuo in KW-ore dovuto all'isteresi diventa metà e si realizza così una forte economia di consumo in KW-ore.

La determinazione delle perdite nel ferro si fa inserendo un wattmetro (o due se il trasformatore è trifase) sul circuito di bassa tensione, tenendo aperto quello ad alta tensione. Invece le perdite per effetto Joule si calcolano colla formola $W = RI^2$ mettendo al posto di R la resistenza ohmica di ciascun circuito e al posto di I le rispettive correnti; oppure anche col sistema già accennato nel precedente paragrafo mettendo in corto circuito il secondario e misurando sul primario la perdita con un wattmetro.

166. Raffreddamento dei trasformatori. — Le perdite di energia interne ai trasformatori causano un riscaldamento e la temperatura che possono assumere dipende dalla superficie e dai mezzi di raffreddamento. Si capisce che a parità di perdite impiccolendo la superficie irradiante del calore, il riscaldamento sarà più grande. Quindi l'aumento di temperatura è una funzione del rapporto: Superficie divisa per le perdite. Questo rapporto si dice *superficie specifica di raffreddamento*.

Il raffreddamento dei trasformatori si fa in quattro modi:

1.° *Raffreddamento naturale in aria* (trasformatori in aria od a secco). In questi trasformatori è l'aria naturale che lambisce la superficie del trasformatore e l'irradiazione che portano via il calore prodotto. Si può eseguire per trasformatori fino a 25-30 mila volt.

2.° *Raffreddamento con ventilazione forzata*. Si impiega pochissimo perchè richiede l'impianto di un ventilatore e dell'aria esente da polvere; gli isolanti di cartone e tessili si essicano eccessivamente.

3.° *Raffreddamento naturale in olio*. I trasformatori di questo tipo sono immersi in casse di lamiera di ferro o di ghisa riempite di olio minerale speciale. I trasformatori ad olio

sono molto diffusi. Lo smaltimento del calore è assorbito dall'aria esterna e dell'irraggiamento. Per aumentare la superficie delle casse si fanno di lamiere ondulate. L'olio interno alle casse forma una circolazione dal basso all'alto sulla superficie dei trasformatori e dall'alto verso il basso presso la superficie interna delle casse. Nei trasformatori si lasciano poi dei canali od intercapedini per facilitare la circolazione dell'olio.

L'olio oltre a sottrarre rapidamente il calore al trasformatore aumenta molto il potere isolante.

4.° *Raffreddamento forzato in olio.* Nei grossi trasformatori in olio, ove si abbia a disposizione acqua sufficiente, si provoca il raffreddamento forzato sia con serpentine di acqua fredda in circolazione immerse nella parte superiore delle casse d'olio; sia facendo circolare l'olio mediante una pompa dentro a serpentine poste in una cassa esterna in cui si mantiene dell'acqua fredda. La superficie di raffreddamento del ferro e rame dei trasformatori a ventilazione naturale si calcola di 30 a 40 cmq. per ogni watt di perdita; da 16 a 24 cmq. per la superficie dei trasformatori immersi nell'olio; 25 — 35 cmq. per le casse d'olio.

Immergendo un trasformatore a secco in casse d'olio la sua potenza può elevarsi da 2,5 a 4 volte.

Le temperature massime nei trasformatori, come in tutte le macchine, si ottengono dopo un certo tempo di funzionamento a pieno carico.

Per il calcolo dell'acqua di raffreddamento dei trasformatori ad olio si procede come segue: sia Q il numero dei litri al 1" necessario a smaltire le perdite nel trasformatore calcolate di P watt, e sia T la differenza di temperatura fra l'acqua che entra e quella che esce.

Ogni litro per ogni grado di riscaldamento esporta una caloria ossia 427 Kgm. × 9,81 W. Per esportare P watt occorreranno ogni minuto secondo

$$Q = \frac{P}{4190 \times T} = \text{litri al secondo}$$

ESEMPIO. — Un trasformatore da 1000 K. V. A. in olio con circolazione acqua ha un rendimento di 98,5. L'acqua disponibile ha una

temperatura di 15° e nell'uscita deve avere 30°. Quale sarà la quantità d'acqua necessaria per il raffreddamento e quale la superficie della serpentina?

R. Le perdite del trasformatore sono di 1,5% ossia:

$$1000 \times 1000 \times 0{,}015 = 15000 \text{ watt}$$

L'acqua necessaria al raffreddamento sarà:

$$\frac{15000}{4190\ (30-15)} = 0{,}24 \text{ litri al } 1''$$

167. Costruzione dei trasformatori. — Nella pratica impiegano due tipi di trasformatori:

1.° trasformatori *a nucleo* od a nocciolo;

2.° trasformatori *a mantello*.

Il primo tipo è più diffuso; in esso il circuito magnetico è formato da due o tre nuclei lamellari verticali (a seconda che il trasformatore è monofase o trifase) uniti sopra e sotto da gioghi onde chiudere il circuito magnetico. (Fig. 322). Sulle colonne sono infilate le matasse primarie e secondarie.

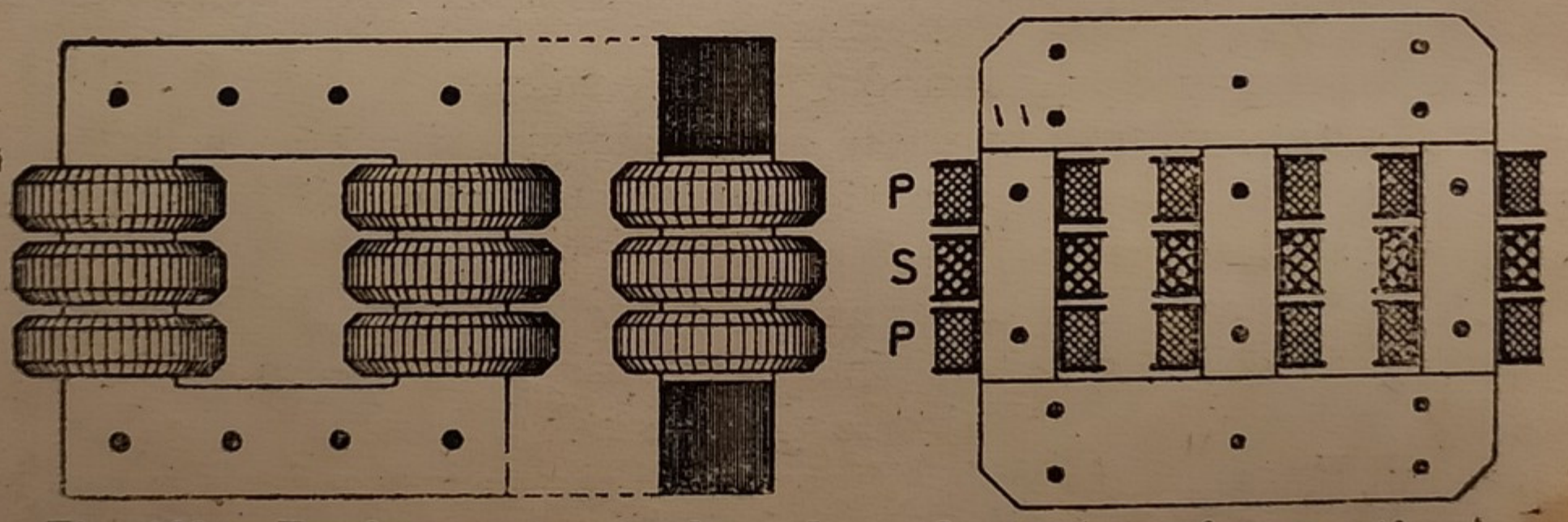


Fig. 322 - Trasformatori a nucleo od a colonne (monofase e trifase).

Nel tipo a mantello gli avvolgimenti restano quasi completamente chiusi dentro il ferro; in essi i nuclei di ferro, interni alle bobine, vengono chiusi esternamente agli avvolgimenti come in un mantello. (Fig. 323).

Nei trasformatori trifasi a nucleo i tre flussi magnetici sono collegati a stella; in quelli a mantello si possono considerare indipendenti.

Nuclei di ferro. I nuclei di ferro dei trasformatori sono formati da lamierini dello spessore di 0,25 a 0,35 mm. di ferro dolce ricotto, o meglio e più spesso di lamierini di ferro al silicio, il quale, come si è detto, offre una perdita di isteresi circa la metà di quella del ferro. I lamierini vengono ritagliati a striscie rettangolari o secondo forme convenienti in modo da utilizzare col minimo sfrido i grandi fogli di lamiera forniti dai fabbricanti. Prima di ritagliare i fogli essi vengono ricoperti da un sottile foglio di carta mediante incollatura ottenuta facendo passare attraverso a due cilindri la lamiera ed il foglio di carta.

Coi lamierini si fanno dei pacchi tenuti insieme da bulloni pieni o bulloni tubolari che devono essere *ben isolati dal*

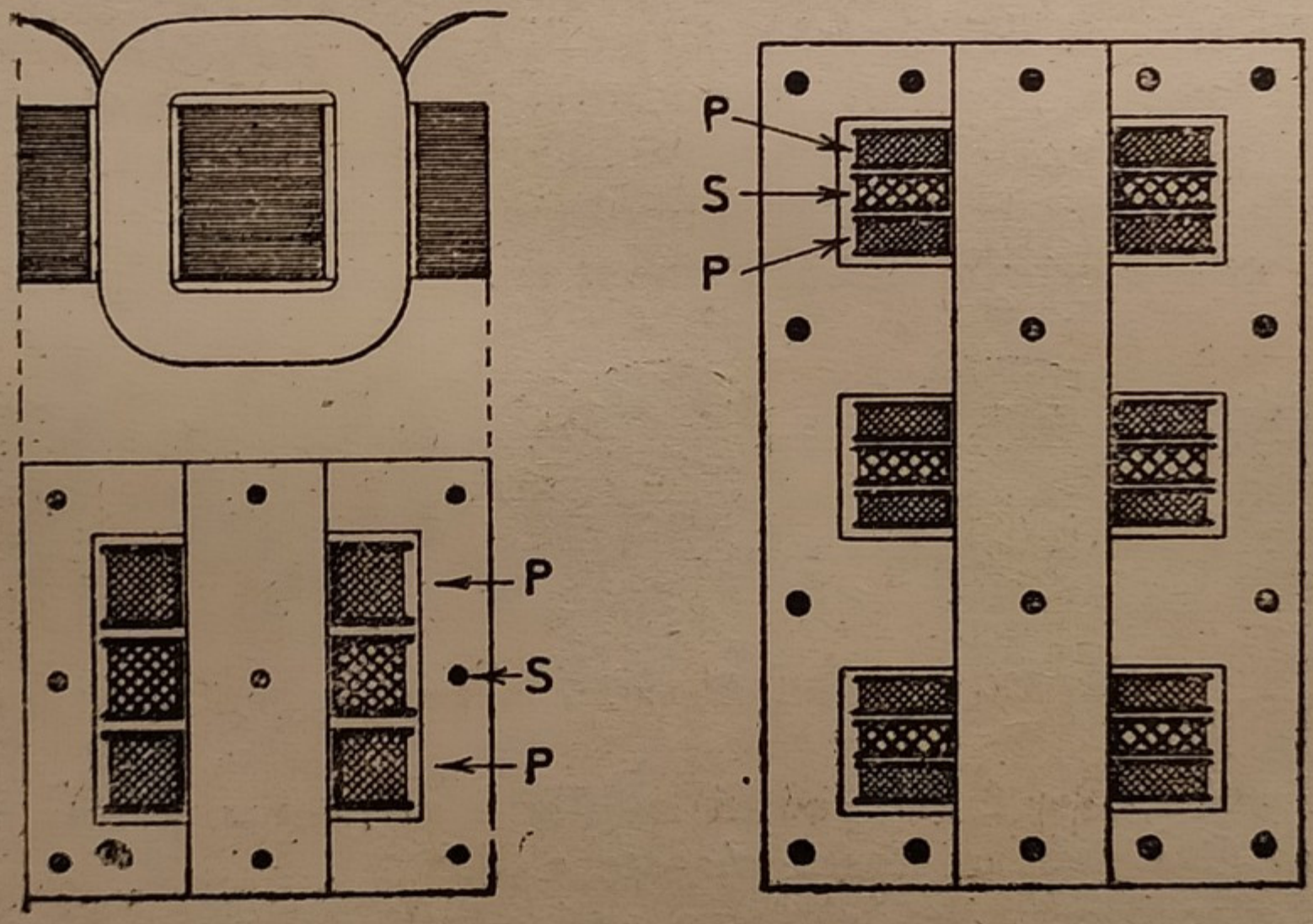


Fig. 323 - Trasformatori a mantello monofase e trifase in sezione.

ferro a mezzo di tubi di cartone e rondelle di cartone o bachelite. La sezione dei pacchi si tiene uniforme pei trasformatori monofasi a nucleo; nei trasformatori a mantello i nuclei interni si tengono di sezione doppia nel mantello; nei trasformatori trifasi a nucleo i gioghi si tengono di sezione alquanto maggiore delle colonne. (Fig. 324-325).

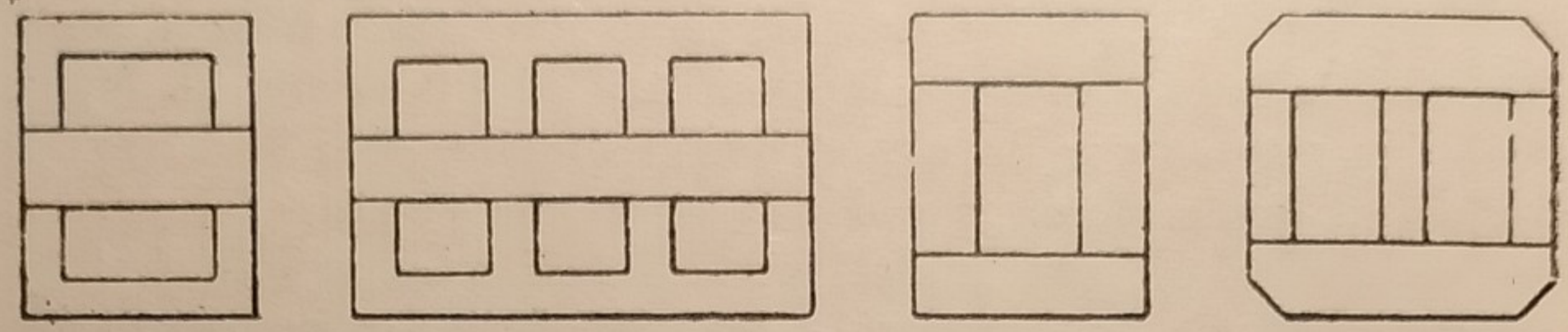


Fig. 324 . 325 - Forme diverse di nuclei per trasformatori.

Le giunzioni dei pacchi per formare i nuclei si fanno a *giunti piani* come sono indicati nella fig. 325 oppure a *lamierini alternati*; in ogni caso i giunti devono essere oggetto di grande cura nella costruzione dei trasformatori perchè essi rappresentano una sensibile riluttanza (resistenza magnetica). Le *piastre facciali* dei nuclei si fanno con lamiere di grosso spessore per esempio di 2 a 4 mm.

La sezione dei nuclei si tiene di forma quadrata, a croce di S. Andrea, smussati a gradini; quasi tutti i costruttori fanno poi i nuclei a pacchi suddivisi lasciando delle intercapedini di un centimetro per ottenere un miglior raffreddamento a mezzo di circolazione d'aria e di olio. (Fig. 326).

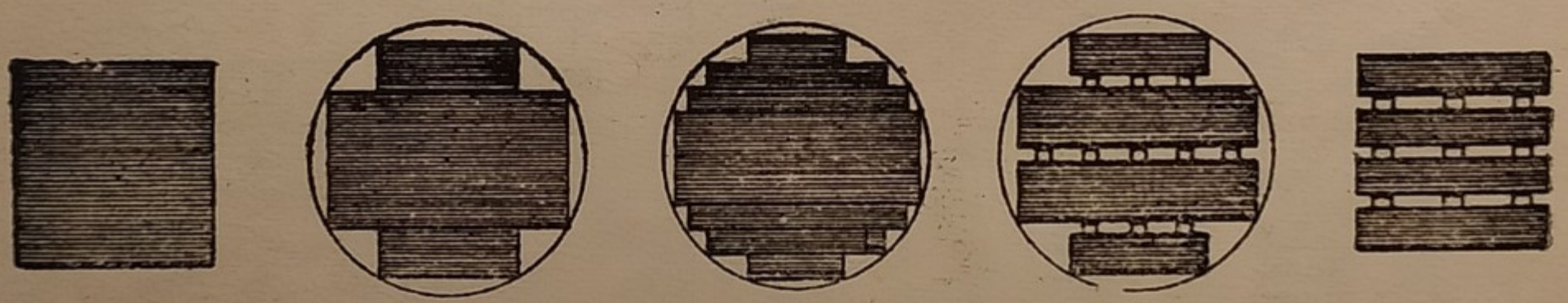


Fig. 326 - Sezioni di nuclei di trasformatori.

La distanza fra i pacchi suddivisi viene mantenuta per mezzo di striscie di ferro piegate a U.

La sezione utile del ferro agli effetti del passaggio del flusso è di circa 85-88% della totale sezione per nuclei con lamierini di 3,5/10 e del 90% per nuclei con lamierini di 5/10.

Avvolgimenti. Gli avvolgimenti si fanno a *matasse cilindriche* pei trasformatori a nucleo ed a *matasse piatte* pei trasformatori a mantello, ed impiegando del filo tondo o piatto rivestito di due coperture a spirale di lino, canape o cotone. Ma per intensità grandi, superiori per esempio a 50-70 Amp.

si impiegano corde di rame e piattine (verghe a sezione rettangolare).

Gli avvolgimenti dei trasformatori a nucleo si preparano a parte al tornio su forme di legno e si montano sulle colonne in due modi: *matasse primarie e secondarie* alternate, oppure a *matasse primarie e secondarie concentriche* le une sulle altre. Il tipo più preferito è il primo.

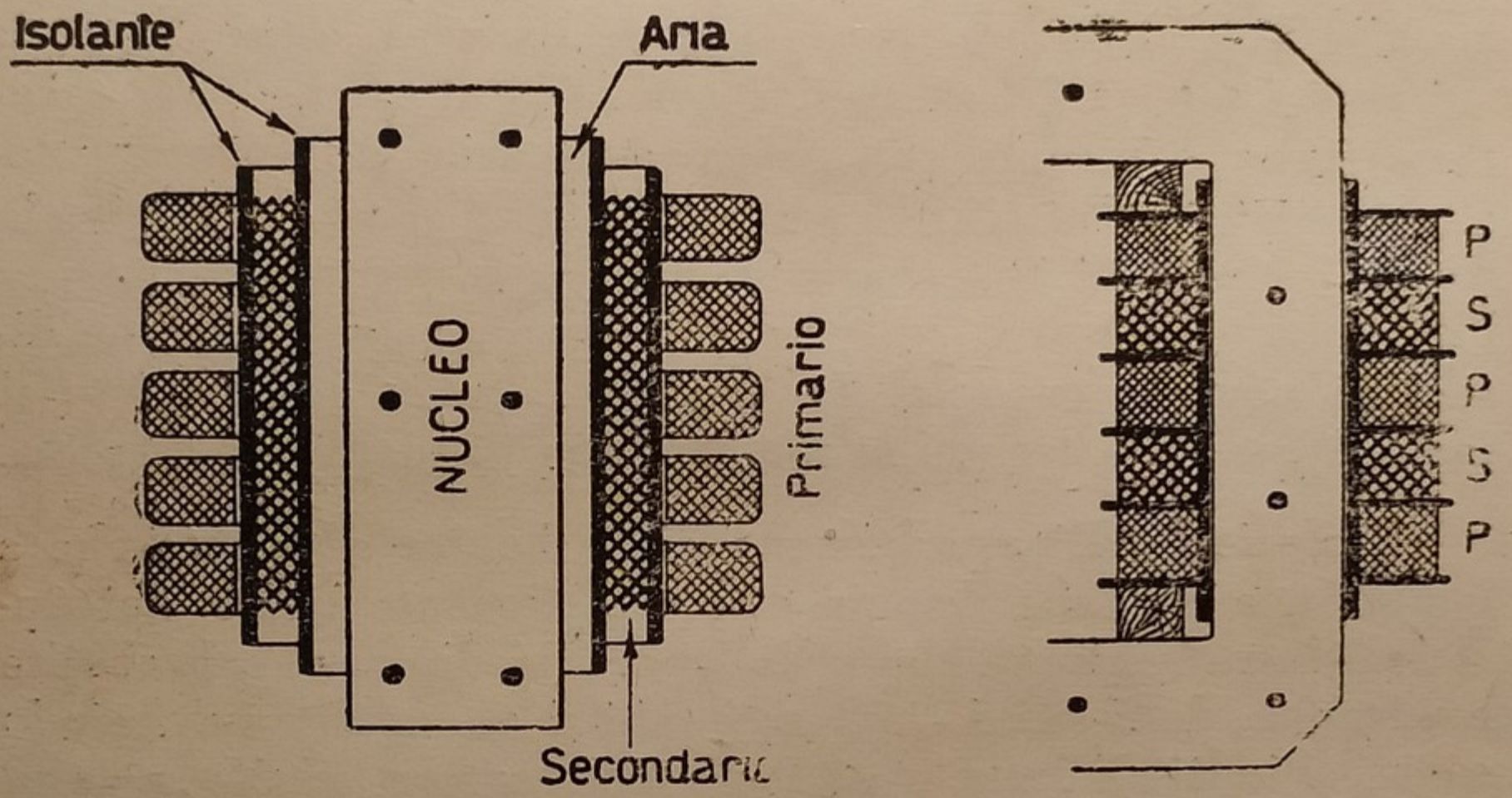
Il limite massimo di tensione per ogni matassa è di 500 Volt, in ogni caso fra gli strati o fra fili vicini della stessa matassa non vi devono essere più di 100 volt. Ogni strato di matassa si separa dal successivo con fogli di carta ed ogni matassa finita si ricopre con nastro ordinario. Le matasse vengono infilate sui nuclei non aderenti una all'altra, ma lasciando da 5 a 10 mm. di interspazio d'aria per la ventilazione e per l'isolamento. Talvolta fra le bobine sovrapposte si mettono dischi di cartone pressato. Le matasse a piattina di rame si fanno spesso avvolgendo la piattina non di piatto ma di costa.

Isolazioni. Gli avvolgimenti sia a bobine alternate che a bobine concentriche devono essere fortemente isolati dai nuclei di ferro mediante dei cilindri o tubi di cartone bachelite e micanite, detti *cartocci.* Questi tubi si ottengono avvolgendo sopra cilindri di latta o di ferro del cartone sottile o della mica-carta con interposizione di vernici a base di gomma lacca o altro materiale incollante. La lunghezza dei tubi isolanti si tiene alquanto maggiore della altezza delle matasse. Lo spessore di questi tubi è diverso a seconda della tensione, si tiene di circa 2 mm. fino a 2000 V., di 2,5 a 3 mm. fino a 4000 V., 3-3,5 per 6000 V , 4-5 mm. per 10000 V. Per la fabbricazione dei cartocci e verniciatura dei cartocci isolanti per trasformatori in olio non si devono adoperare lacche solubili nell'olio.

Se gli avvolgimenti sono concentrici occorrono due tubi isolanti: uno sul nucleo di ferro e l'altro tra primario e secondario. Può essere esterno il primario e interno il secondario o viceversa; ma di solito si mette l'avvolgimento a bassa tensione in filo o in piattina sul nucleo di ferro e l'avvolgimento alta tensione in matasse esterne. (Figg. 327-328).

Regole generali. Le bobine primarie alternate colle secondarie devono essere messe simmetricamente; per esempio le due bobine estreme delle colonne di solito si fanno primarie

ed aventi lo stesso numero di spire. Anche le matasse piatte dei trasformatori a mantello devono essere perfettamente uguali siano esse primarie che secondarie. Nel caso specialmente in cui le bobine costituenti l'avvolgimento di una colonna dovessero essere messe fra loro in parallelo occorre che il numero delle spire delle matasse che sono in parallelo, sia perfettamente uguale e che le bobine rispetto al flusso magnetico siano in identiche condizioni di simmetria.



Figg. 327 - 328 - Sezioni di un trasformatore con bobine concentriche e con bobine alternate.

E' stato osservato che le matasse terminali degli avvolgimenti, e sopratutto quelle connesse coi morsetti, sono più soggette a danneggiarsi che le altre; è necessario prevenire questo inconveniente isolando più fortemente queste matasse.

Nel riguardo del consolidamento meccanico delle matasse i trasformatori a mantello sono in condizioni migliori degli altri, poichè le matasse piatte restano rinserrate nei grandi canali dei nuclei e non possono muoversi.

168. Trasformatori trifasi. — Come abbiam visto i trasformatori trifasi a nucleo sono formati da tre nuclei di ferro dette *colonne* sul quale sono infilate le matasse e da due gioghi della sezione delle colonne. Nei trasformatori a mantello

i circuiti, sotto forma di matasse piatte, sono avvolte esternamente dal ferro del mantello.

Le tre fasi primarie e le tre fasi secondarie possono essere collegate in quattro modi:

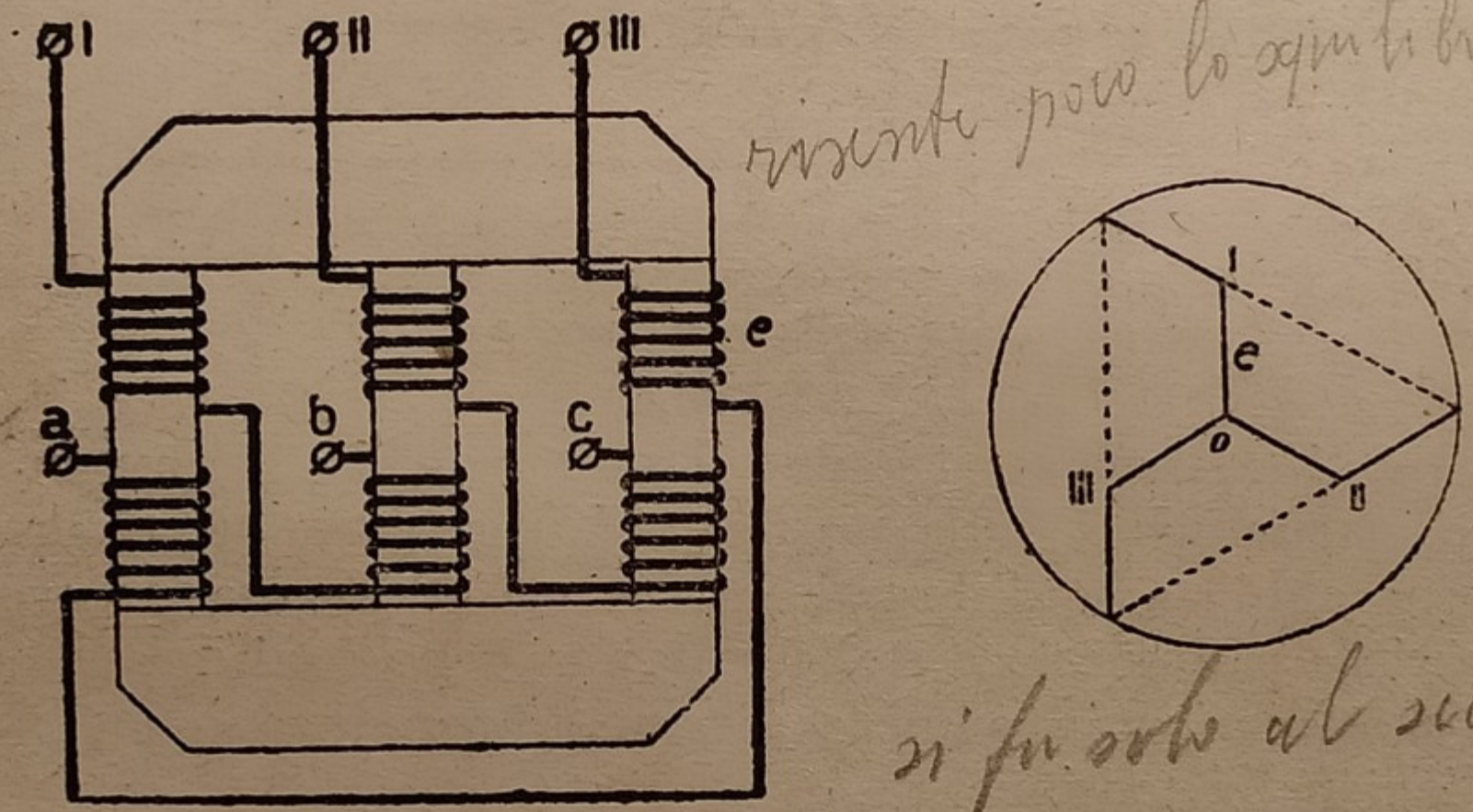
1.° Primario a stella — secondario a stella.

2.° Primario a triangolo — secondario a triangolo.

3.° Primario a stella — secondario a triangolo.

4.° Primario a triangolo — secondario a stella.

Si impiegano pure nella pratica dei trasformatori detti a zig-zag nei quali il secondario è avvolto sulle colonne secondo lo schema della fig. 329-330.



Figg. 329 - 330 - Trasformatori a zig--zag e schema delle f. e. m.

Ogni avvolgimento di colonna è diviso in due parti uguali. L'avvolgimento superiore della fase I è in serie con quello inferiore della fase II preso in senso rovescio; l'avvolgimento superiore della fase II è in serie con quello della fase III inferiore in senso rovescio; infine la fase III superiore è in serie colla I inferiore in senso rovescio. I tre estremi ABC si uniscono a stella.

I trasformatori a zig-zag sono perfettamente paragonabili a quelli aventi il secondario a triangolo; se il rapporto di trasformazione è uguale, un trasformatore col primario a stella e il secondario a triangolo si può accoppiare al primario ed al

secondario con un trasformatore avente primario a stella, secondario a zig-zag.

I trasformatori più usati hanno il primario ed il secondario a stella. Però ove si debba alimentare linee trifasi a 4 fili, si devono impiegare trasformatori col primario a triangolo e secondario a stella, oppure primario a stella e secondario a zig-zag. (Fig. 331).

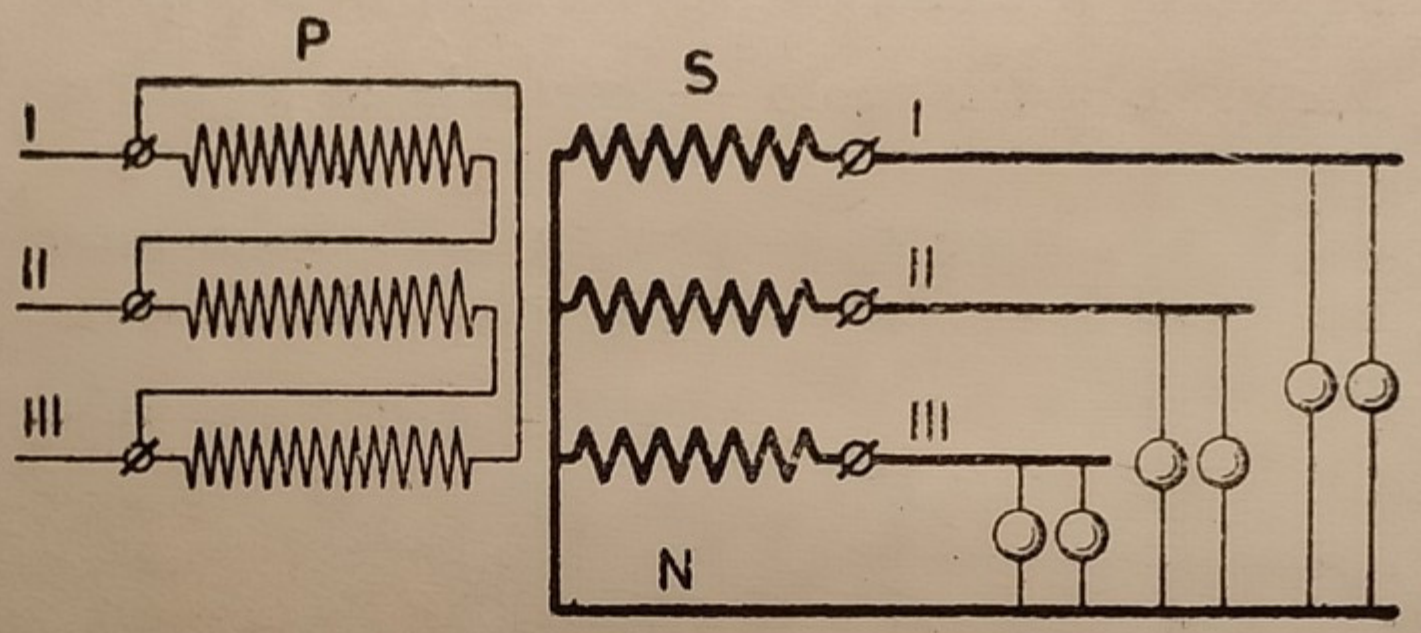


Fig. 331 - Schema di un trasformatore col primario a triangolo e secondario a stella per linee a 4 fili.

Questi trasformatori hanno il vantaggio che si possono caricare inegualmente sulle tre fasi nel secondario senza che la tensione abbia a squilibrarsi. Invece coi trasformatori aventi primario e secondario a stella se le fasi sono squilibrate, cioè hanno un carico in ampère diverso, si producono dei forti squilibri nella tensione.

169. Accoppiamento dei trasformatori. — I trasformatori vengono generalmente accoppiati fra loro nelle *sottostazioni o cabine di trasformazione*. L'accoppiamento si fa sempre in derivazione sul primario e sul secondario. La fig. 332 rappresenta due trasformatori monofasi, che è il caso più semplice, in parallelo.

Le condizioni per le quali due o più trasformatori si possono mettere in parallelo sono:

1.° I rapporti delle tensioni primarie e secondarie devono essere uguali.

2.° Le cadute di tensione da carico zero a carico massimo devono essere uguali.

3. Le correnti secondarie devono avere la stessa fase e cioè coincidere gli istanti di massimo e di zero delle tensioni.

La condizione prima è evidente; per la seconda è necessario che i trasformatori abbiano la stessa caduta ohmica nei due circuiti.

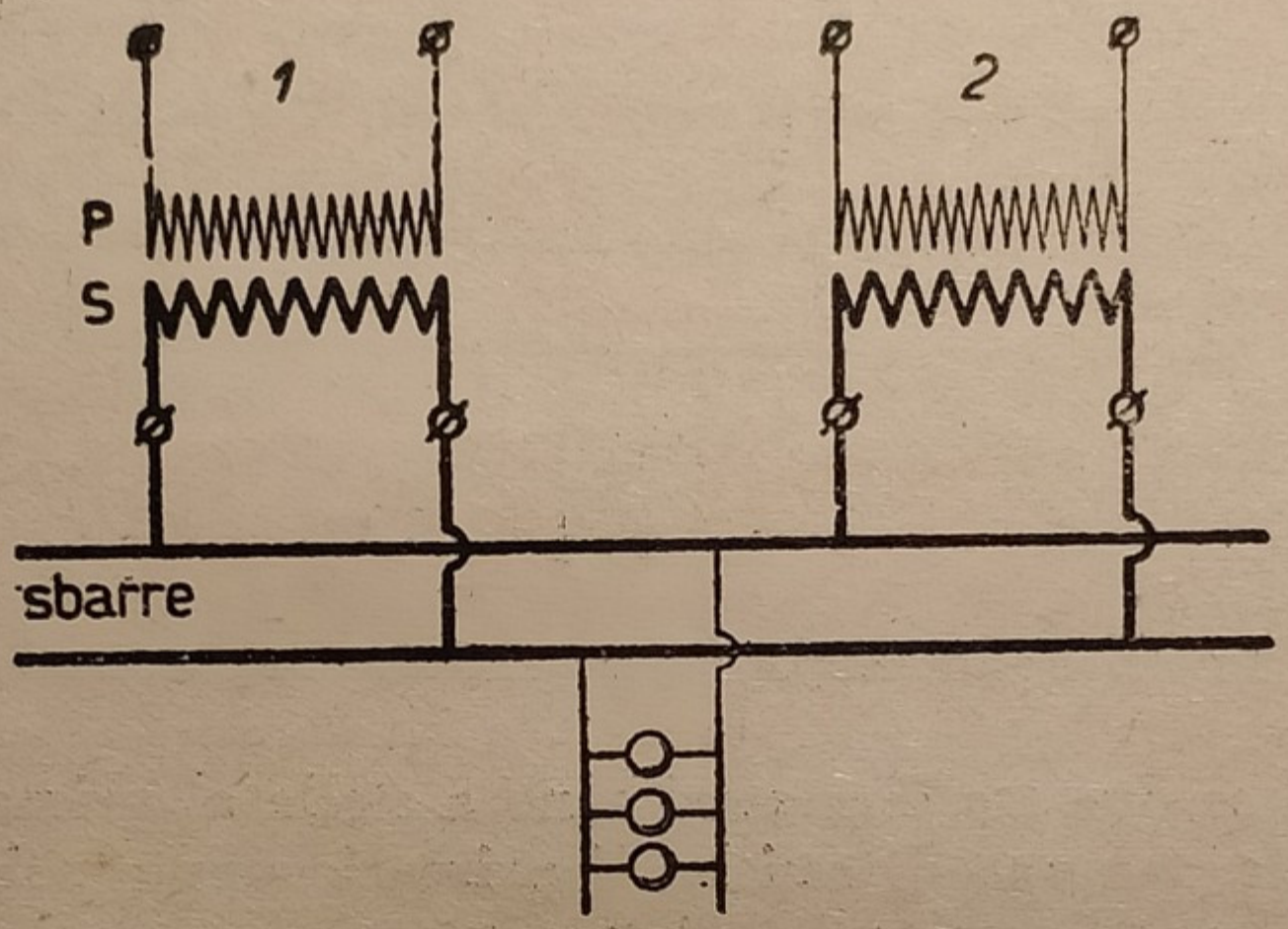


Fig. 332 - Schema di accoppiamento di due trasformatori monofasi.

Circa la condizione 3 osserviamo che nei trasformatori monofasi le fasi delle f. e. m. nei secondari dipendono dal senso di avvolgimento delle matasse. Così se nei due trasformatori della fig. 332 il secondario del N. 2 è avvolto in senso contrario a quello del N. 1 le f. e. m. saranno in opposizione e cioè gli attacchi alle sbarre come sono segnati nella figura non possono farsi, ma devono essere invertiti per uno dei due trasformatori.

Per capire se, prima di fare il parallelo, i due secondari sono in fase fra loro occorre di inserire delle lampade o dei voltmetri nel modo indicato dalla fig. 333. Se le lampade rimangono spente od i voltmetri segnano zero, allora è segno che le f. e. m. sono perfettamente in fase e che si può fare l'attacco del trasformatore.

Anche coi trasformatori trifasi si danno parecchi casi in cui non si può fare il parallelo sui secondari perchè le fasi delle correnti riescono spostate, pur avendo l'esatto rapporto di trasformazione e la stessa caduta di tensione.

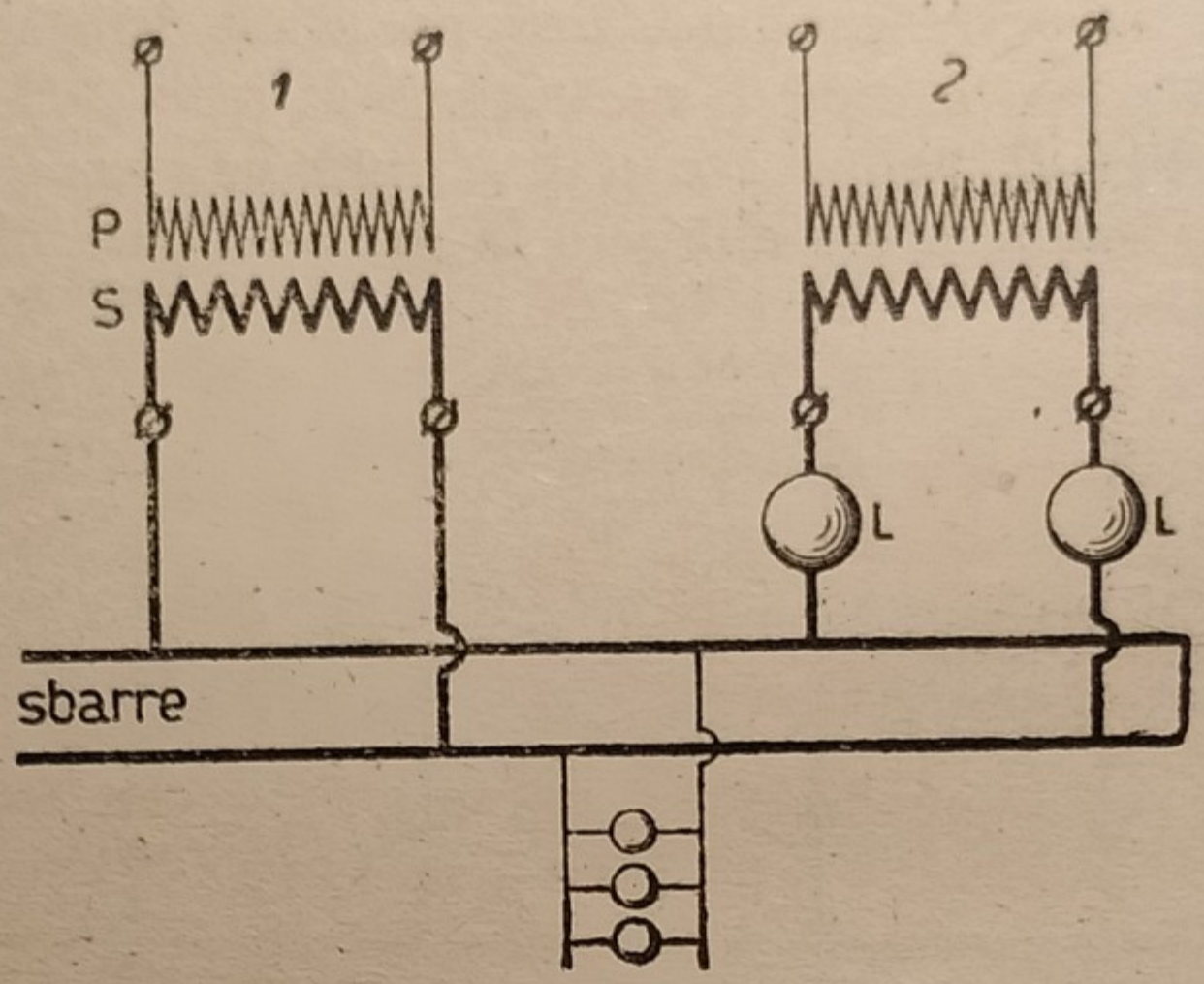


Fig. 333 - Inserzione di lampade per verificare l'uguaglianza delle fasi.

Così se due trasformatori sono a stella al primario ed al secondario, ma uno di essi ha il primario oppure il secondario, avvolto sul nucleo in senso contrario la corrente trifase riesce in opposizione (180°) rispetto a quella dell'altro. (Fig. 335).

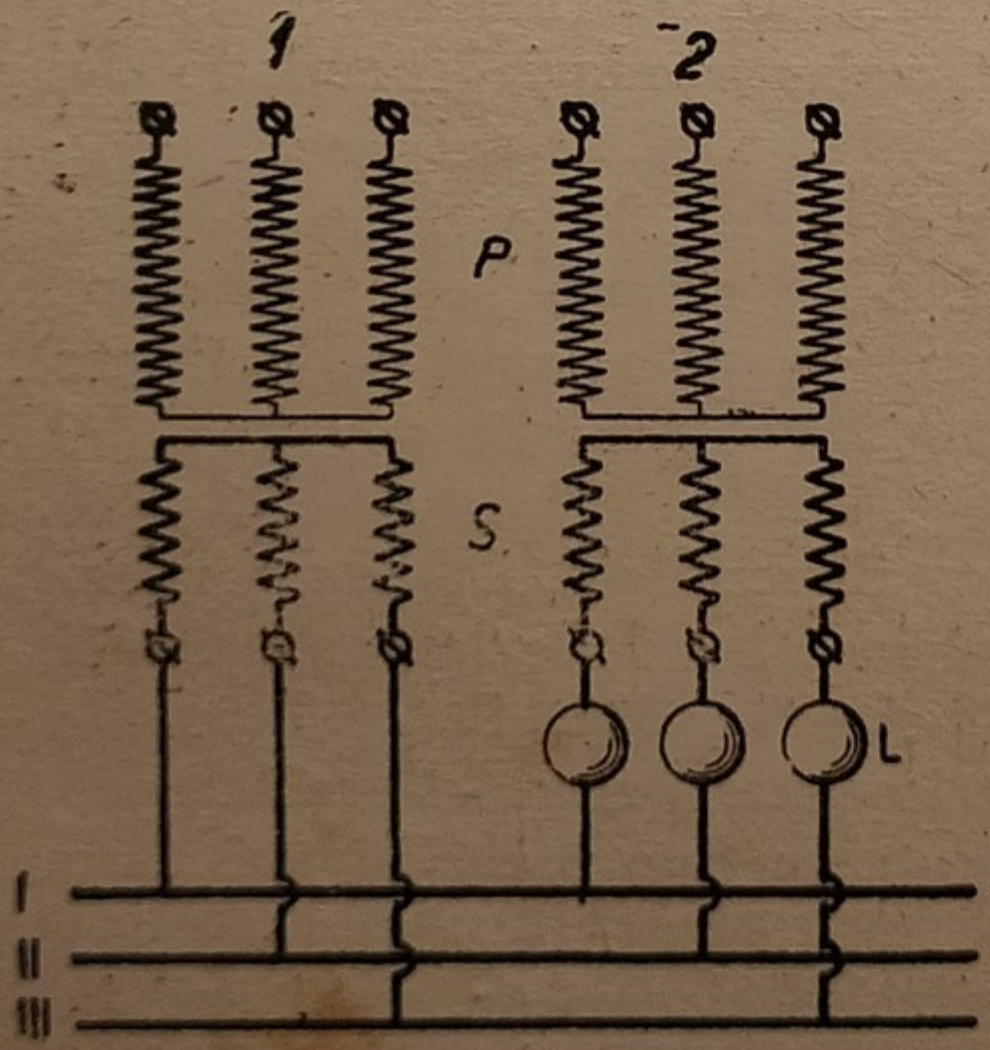


Fig. 334 . Modo di verificare colle lampade se le fasi sono giuste.

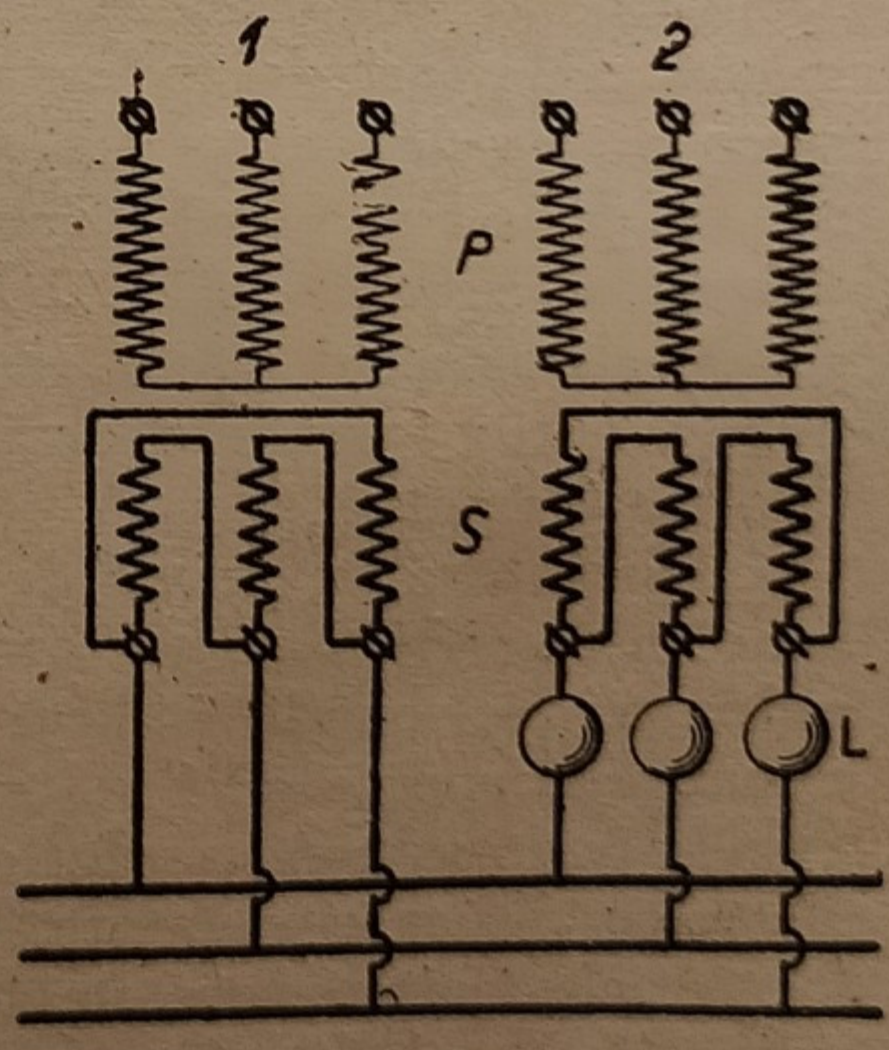


Fig. 335 - Secondari a triangolo colle fasi invertite e verifica colle lampade.

Per rimettere in fase il trasformatore da accoppiare in parallelo bisogna trasportare gli attacchi del centro neutro all'altra estremità della colonna. Quindi se il collegamento delle tre fasi (primarie o secondarie) era in alto, lo si porta al basso e il circuito esterno lo si attacca ai tre capi rimasti liberi.

Correnti spostate di 180° si hanno pure quando di due trasformatori coi secondari o coi primari a triangolo gli attacchi di collegamento fra le fasi sono inversi come è chiaramente indicato dalla fig. 335. Anche in questo caso non è possibile fare il parallelo se non facendo uno scambio degli attacchi interni fra le fasi.

Per riconoscere prima di fare gli attacchi definitivi alle sbarre se le fasi sono giuste si inseriscono tra i trasformatori e le sbarre delle lampade o dei voltmetri si osserva se le lampade rimangono spente o se i voltmetri segnano zero.

Altri casi in cui non è possibile fare il parallelo sono ad esempio: Un trasformatore col primario a stella e secondario a stella con un altro avente primario a stella e secondario a triangolo o viceversa. Oppure un trasformatore con primario a triangolo e secondario a triangolo con altro avente primario a triangolo e secondario a stella.

I trasformatori con secondario a zig-zag si comportano come se avessero i secondari a triangolo.

Invece di trasformatori trifasi si può trasformare la corrente trifase da alta in bassa tensione o viceversa con tre tra-

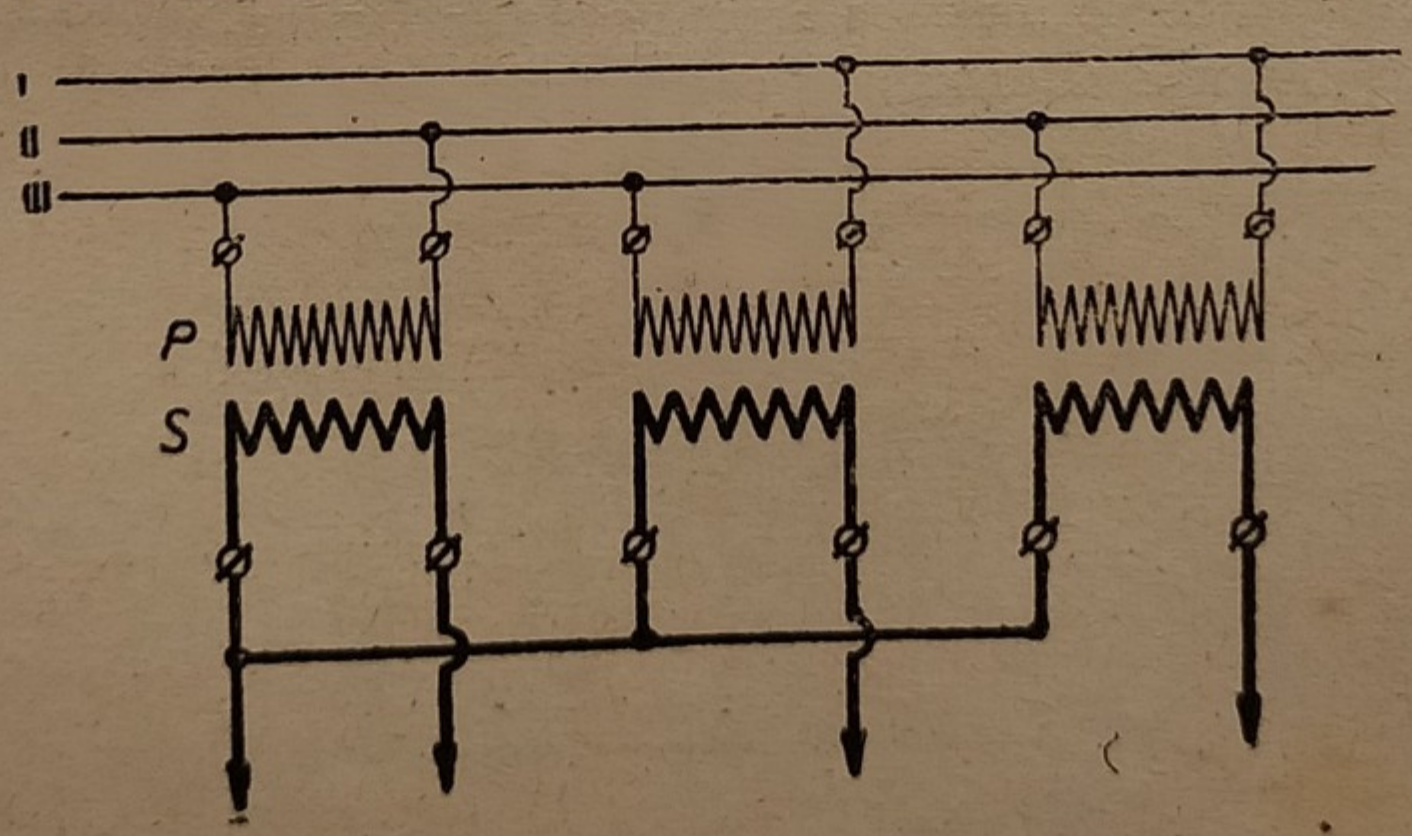


Fig. 336 - Collegamento a stella dei secondari di tre trasformatori monofasi.

sformatori monofasi, collegando i secondari a stella od a triangolo. (Fig. 336-337). Se il secondario è a bassa tensione prima di chiudere il triangolo è prudente inserire delle lampade per capire se l'accoppiamento è giusto.

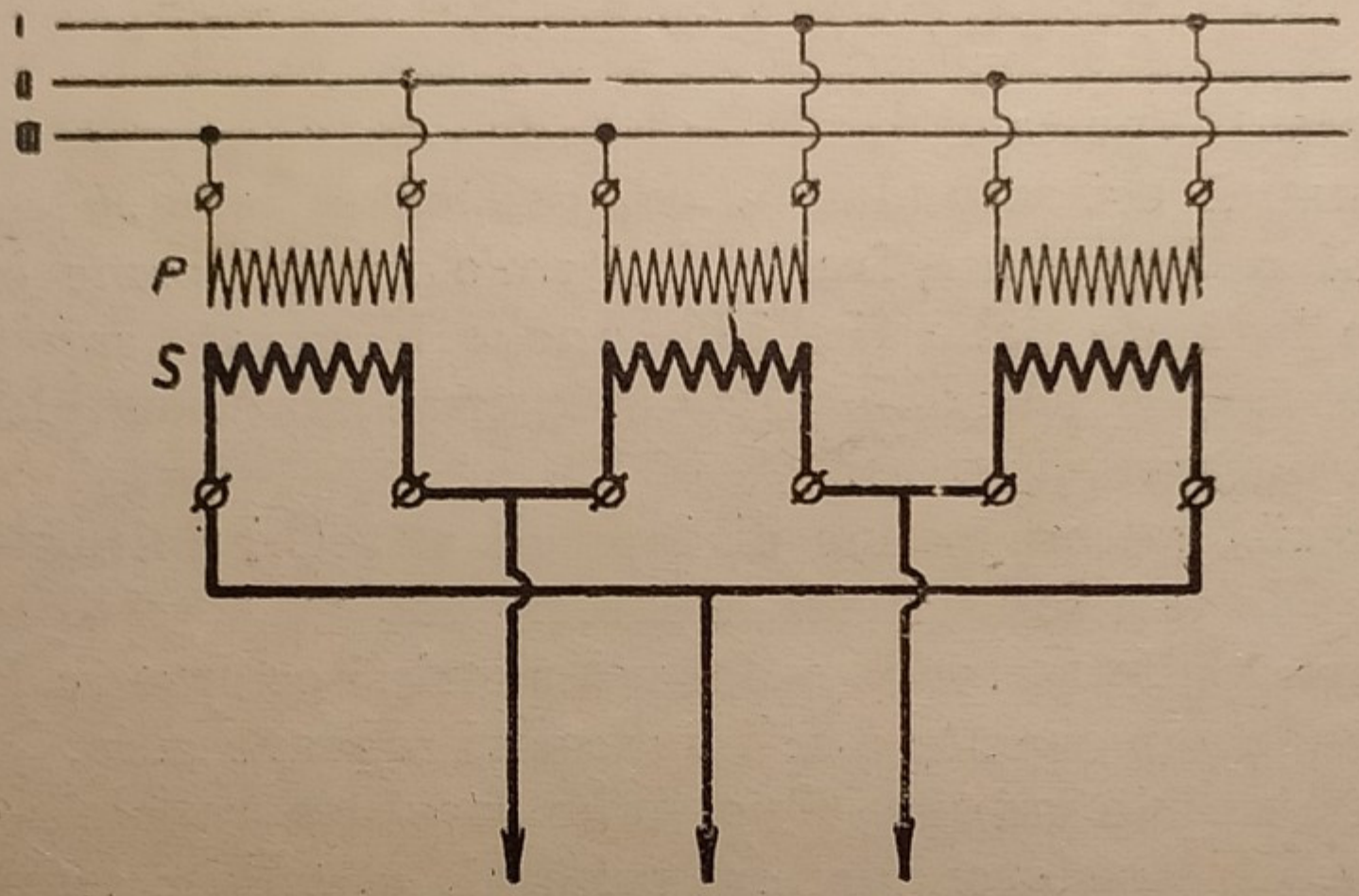


Fig. 337 - Accoppiamenti di tre monofasi in triangolo.

170. Autotrasformatori. — Sono trasformatori che invece di avere due avvolgimenti distinti e ben separati, hanno un solo avvolgimento con una derivazione comprendente un certo numero di spire, in modo che l'una parte del circuito fa da primario e l'altra da secondario. (Fig. 338). Però il primario ed il secondario non devono essere uno dopo l'altro sul nucleo di ferro, come parrebbe dalla figura, ma uno sopra l'altro, a bobine alternate o concentriche.

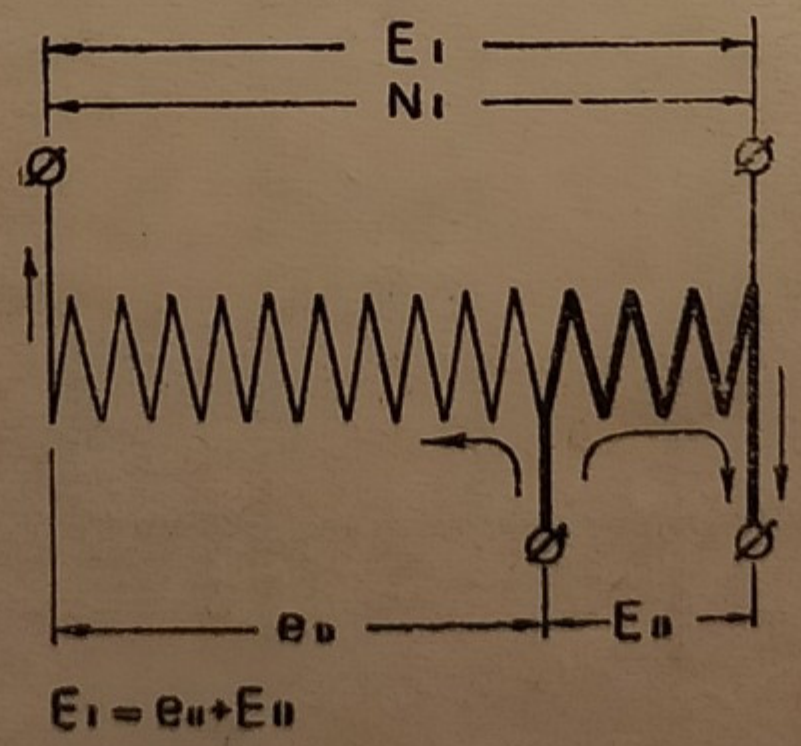


Fig. 338 - Schema di autotrasformatore monofase.

Il primario è in serie col secondario e della corrente che passa al circuito secondario una parte viene trasferita direttamente ed una parte trasformata. Se per esempio un trasformatore ha il rapporto $N_1 : N_2 = 2$, allora metà dell'energia del circuito primario passa direttamente al circuito secondario e metà si svolgerà per induzione nello stesso secondario. Quindi basta metà potenza, di quella equivalente a un trasformatore con primario e secondario separati.

La fig. 339 rappresenta un autotrasformatore trifase a stella.

Gli autotrasformatori si impiegano solo quando il rapporto di trasformazione è fra 1 e 3. Presentano il pericolo che, ove un filo del circuito esterno andasse in contatto colla terra sul circuito secondario si potrebbero formare delle sovratensioni. Da ciò la necessità di munire questi autotrasformatori di apparecchi rivelatori di sovratensioni (voltmetri a terra con avvisatori) o apparecchi protettori (parafulmini regolati per la tensione più bassa).

171. Trasformatori da trifase in bifase o viceversa. - Sistema Scott. — Un gruppo di trasformatori Scott comprende, come è dimostrato dalla fig. 340 due monofasi

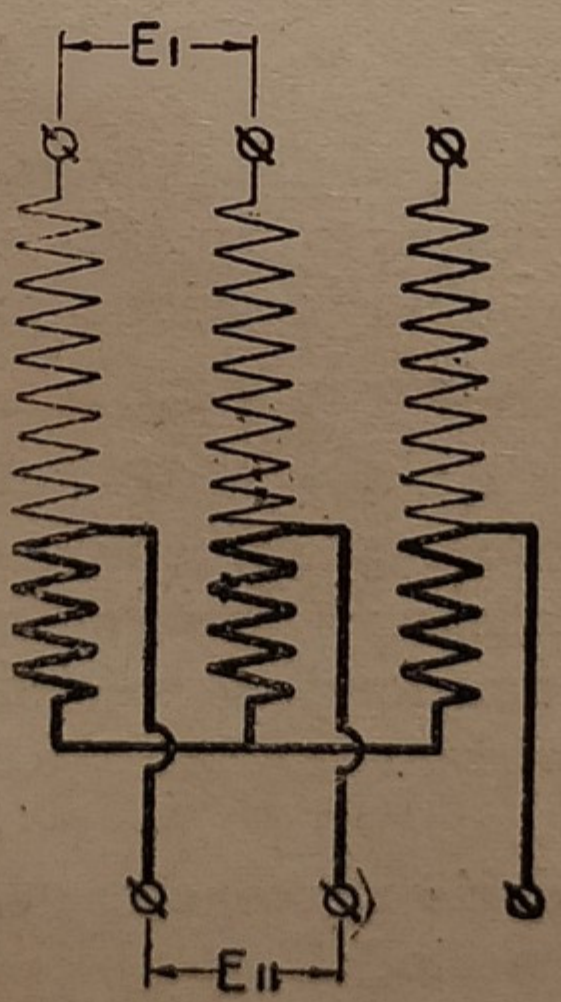


Fig. 339 . Schema di autotrasformatore trifase.

T_1 e T_2 aventi i secondari uguali mentre il primario del trasformatore T_1 è allacciato fra la fase III. ed il punto di mezzo del primario del trasformatore T_2 il quale è in derivazione tra le fasi I. e II. del circuito primario trifase. Così disposti, se indichiamo con A B C il triangolo rappresentativo delle tre tensioni primarie, il T_2 avrà la tensione primaria A B

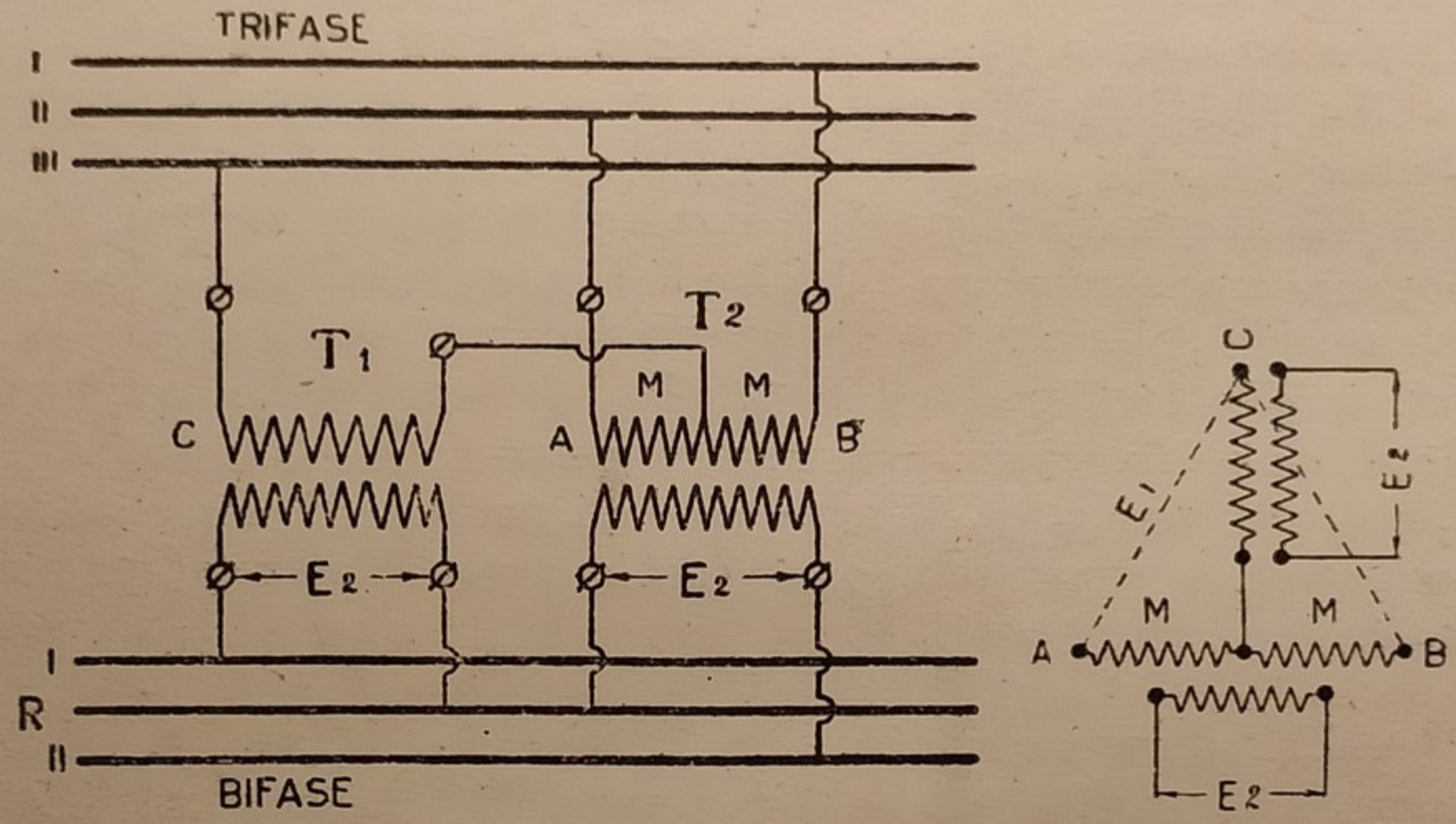


Fig. 340 - Schema dei trasformatori Scott da bifase in trifase o viceversa.

ed il T_1 quella corrispondente alla altezza C D del triangolo. Ma siccome C D è uguale a $^1/_2 \sqrt{3}$ A B, così per avere nei due secondari la stessa tensione, bisognerà mettere le spire primarie nello stesso rapporto di A B a C D. Perciò il trasformatore T_1, avendo minor tensione primaria, dovrà avere un numero di spire primarie pari a $^1/_2 \sqrt{3}$ ossia 0,866, di T_2.

Di solito, i trasformatori in Scott (due monofasi) hanno 5 morsetti primari corrispondenti: due alle estremità dell'avvolgimento; due che comprendono solo 0,866 delle stesse spire di avvolgimento e l'ultimo morsetto attaccato al punto di mezzo.

Le correnti secondarie riescono esattamente sfasate di 90° ossia di un quarto di periodo.

La disposizione è usata frequentemente per alimentare colla corrente trifase alta tensione dei forni elettrici monofasi.

172. Prove di trasformatori. — Le prove principali che si fanno sui trasformatori per assicurarsi del loro comportamento, della loro bontà, delle loro caratteristiche sono:

1.° Prove del rendimento.
2.° Determinazione della caduta di tensione.
3.° Determinazione del riscaldamento.
4.° Prove di isolamento.
5.° Determinazione del rapporto e verifica dell'equilibrio delle fasi.

Prove di rendimento. Le prove di rendimento si fanno sempre col metodo indiretto cioè colla determinazione delle singole perdite. Il metodo di misura diretta dell'energia primaria e secondaria con wattmetri inseriti sui due circuiti è da scartarsi perchè può facilmente dar luogo a errori grossolani ove non si disponga di strumenti esattissimi.

Le perdite nei trasformatori sono: 1.° per isteresi e correnti di Foucault nel nucleo; 2.° per effetto Joule nei conduttori primario e secondario e per correnti di Foucault nei medesimi quando fossero di notevoli dimensioni. Le prime si rilevano misurando con un wattmetro (o con due wattmetri se si tratta di trifase) le perdite a vuoto ed a piena tensione cioè inserendo il wattmetro sul circuito primario tenendo aperto il secondario o anche viceversa. Le perdite per effetto Joule si possono calcolare misurando la resistenza R_1 del primario R_2 del secondario; conoscendosi le intensità I_1 e I_2 le perdite saranno:

$$P = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$$

Ma con questo metodo si trascurano le perdite per le correnti di Foucault nei conduttori; si preferisce pertanto di chiudere in corto circuito ad esempio il secondario, inserendovi un amperometro e di alimentare il primario attraverso un wattometro con una tensione appena sufficiente per creare nell'amperometro la corrente normale I_2 del trasformatore. Con ciò si commette un errore di più, poichè il wattmetro oltre alle perdite nei conduttori segna anche quella per isteresi nel ferro; ma siccome quando il trasformatore è chiuso in corto circuito, l'induzione nel ferro è bassissima, così l'errore che si commette è molto piccolo e trascurabile. Si avrà cura di

non introdurre in queste misure delle perdite accessorie e cioè si devono impiegare amperometri di bassa resistenza, connessioni amperometriche corte; si avrà cura di pulire i contatti, ecc.

Le perdite totali si avranno sommando quelle di isteresi nel nucleo e quelle per effetto Joule. Il rendimento del trasformatore è dato:

$$\text{Rend.} = \frac{\text{Watt resi}}{\text{Watt resi} + \text{Perdite}}$$

Al posto dei watt resi si mettono i watt normali di potenza garantita dal costruttore.

Determinazione della caduta di tensione. Per provare la caduta di tensione ci riferiamo a quanto abbiamo detto al paragrafo 163 - 164 e al diagramma circolare di Kapp.

Determinazione del surriscaldamento. Anche qui dobbiamo rammentare che il limite massimo di potenza che può raggiungere un trasformatore è determinato dal limite più alto di temperatura negli avvolgimenti, tollerabile per una buona conservazione degli isolanti. Come massimi limiti di temperatura tollerabili sono fissati nelle norme della Associazione Elettrotecnica Italiana:

Avvolgimenti in cotone non impregnato 85°

Avvolgimenti in cotone e carta impregnati 95°

Avvolgimenti dei trasformatori in olio 90°

Olio dei trasformatori 85°

Deducendo da queste temperature le massime temperature prevedibili di ambiente e che di solito si ritengono fra 35° e 40° si avranno le temperature di sopprariscaldamento. Le misure di temperatura si fanno con termometri applicati ai trasformatori che lavorano a pieno carico finchè la temperatura stessa è diventata stazionaria.

Generalmente, se il trasformatore è *a secco*, si mette il bulbo di un primo termometro graduato per 150° in un foro praticato nel nucleo di ferro; un secondo termometro lo si lega sopra agli avvolgimenti, fasciando opportunamente con bambagia il punto di applicazione per impedire la dispersione del calore. Un terzo termometro serve a rilevare la temperatura ambiente. Se l'ambiente contiene altre macchine che irradiano calore, allora bisogna fare la media di più termometri d'ambiente. Se il trasformatore è ad olio si limita il rilievo della temperatura a quella dell'olio nello strato superiore più caldo.

Per accertarsi che la temperatura è stazionaria si usa di fare le curve di riscaldamento, portando in disegno sopra un asse delle ascisse il tempo in ore e mezz'ore e sopra le ordinate le letture dei diversi termometri. In tal modo si può constatare quando la temperatura del trasformatore diventa assintottica all'asse delle ascisse. In generale occorrono, perchè la temperatura diventi stazionaria, da 15 a 20 ore pei grossi trasformatori, e da 10-14 per quelli di media potenza.

Un altro sistema per rilevare l'aumento di temperatura consiste nel misurare la resistenza degli avvolgimenti prima a freddo poi a caldo, quando si è raggiunto il massimo del riscaldamento. Per la calcolazione ci riferiamo a quanto si è detto nel paragrafo 157.

Se la temperatura ambiente fosse aumentata nel tempo dell'esperimento, bisognerebbe togliere dal valore della temperatura trovata l'aumento della ambiente. Per trovare il valore delle resistenze dei circuiti si ricorre al sistema della corrente continua con inserzioni di voltmetro e di amperometro: occorre che gli strumenti siano esattissimi.

Prove di rigidità. Le prove di rigidità degli isolanti si fanno per garanzia della bontà degli isolanti che separano il primario dal secondario e l'uno e l'altro dal nucleo magnetico. Le prove di rigidità si fanno seguendo determinate norme che noi abbiamo riassunte al parag. 157. Le prove si devono fare quando il trasformatore è caldo e dopo un esercizio di parecchie ore.

173. Regolatori di tensione a induzione. — Questi apparecchi servono a regolare la tensione di un circuito a

corrente alternata; essi sono costruiti come i motori asincroni di cui diamo la descrizione più avanti, solo che il rotore invece di girare liberamente è tenuto a muoversi solo di un angolo limitato. La fig. 340 rappresenta schematicamente un regolatore di tensione per corrente monofase.

Sopra un anello di ferro (statore) suddiviso vi sono due avvolgimenti disposti in modo da creare un flusso alternativo diametrale. Nell'interno dell'anello vi è un nucleo cilindrico (rotore) che può essere ruotato intorno all'asse di un certo angolo per mezzo del meccanismo di un ingranaggio e di una vite senza fine. Nella figura l'avvolgimento dell'anello fisso è

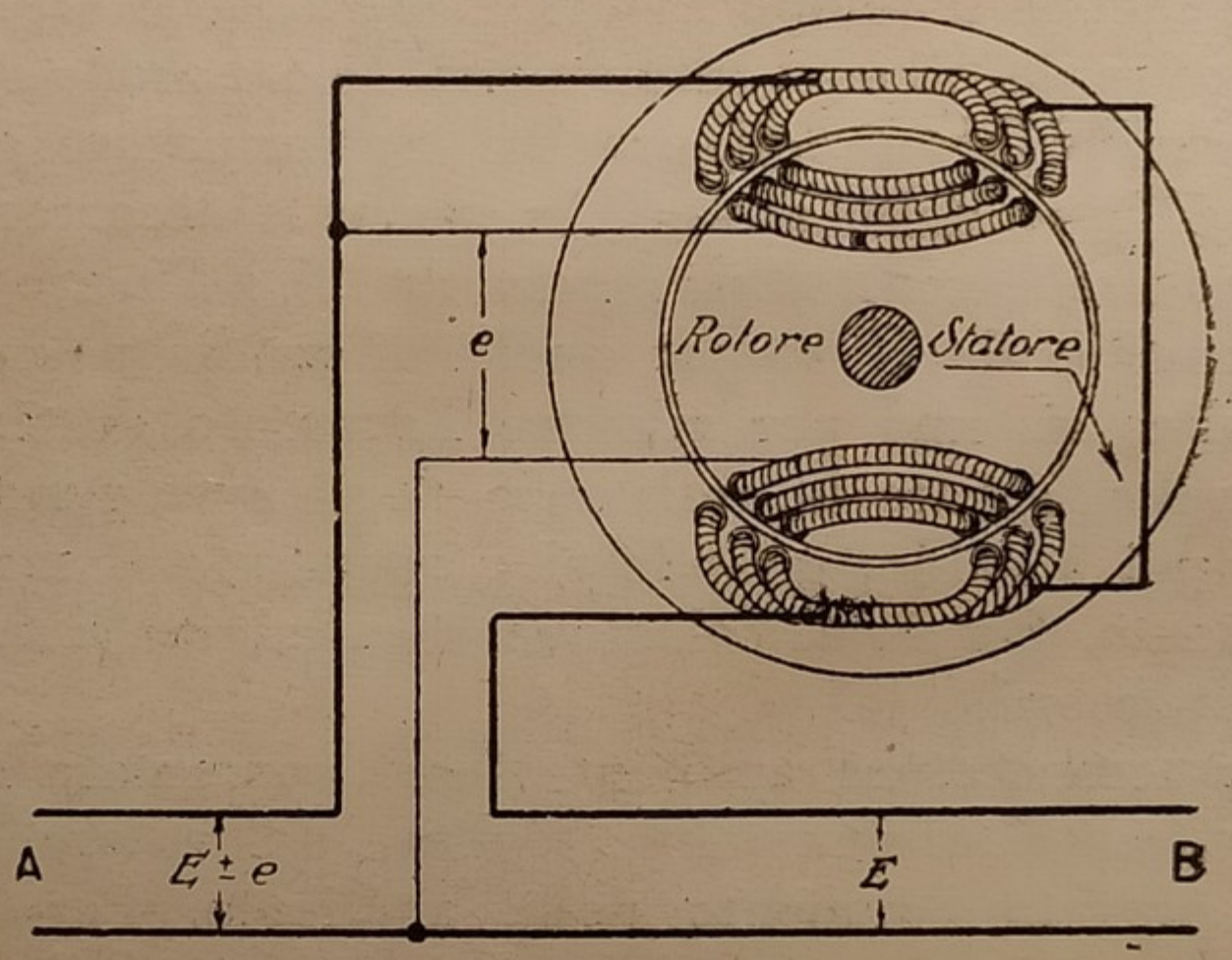


Fig. 341 - Schema di regolatore di tensione.

in serie con un circuito; quello del cilindro è in derivazione sul medesimo. Nella posizione indicata l'apparecchio costituisce un trasformatore. Se E è la tensione in arrivo del lato B, ed *e* la tensione che si sviluppa per induzione nell'avvolgimento rotorico, nel punto A del circuito avremo una tensione $E \underline{+} e$ a seconda che la tensione sviluppata nell'avvolgimento fisso è in fase o in opposizione di fase della f. e. m. E.

Inclinando a poco a poco il *rotore*, l'azione induttiva diminuisce fino a che $e = o$ poi aumenta in senso opposto rispetto a E. La tensione in B può essere costante e variabile la tensione in A; oppure può farsi il contrario.

I regolatori ad induzione servono a mantenere costante la

tensione alle estremità delle linee che hanno una caduta forte di tensione e che non si può compensare elevando, nella centrale generatrice, la tensione di partenza. Il regolatore indicato nella figura 340 è monofase, ma si costruiscono anche trifasi; può essere manovrato a mano oppure può essere reso automatico.

I due circuiti dello statore e del rotore potrebbero appartenere a due circuiti separati uno facente da primario e l'altro da secondario.

Servono altresì nei laboratori di costruzione delle macchine elettriche, strumenti di misura, cavi ecc. per regolare e cioè elevare, abbassare la tensione della corrente alternata, la quale come è noto, è sempre distribuita a tensione costante.

CAPITOLO XI.

Motori elettrici a corrente continua ed alternata.

174. Motori a corrente continua. — Questi motori sono basati sul principio delle azioni elettrodinamiche svolto al parag. 67 e precisamente sul seguente: *tutte le volte che un conduttore percorso da una corrente è messo in un campo magnetico in direzione perpendicolare alle linee di forza, esso si muove o tende a muoversi tagliando il flusso con una forza espressa in dine da:*

$$l \times H \times I$$

dove l è la lunghezza in cm: H l'intensità del campo, I la intensità della corrente in unità C. G. S. (ossia 10 volte più grande dell'unità *ampère*).

La direzione impressa al movimento del filo riesce contraria a quella che si dovrebbe imprimere al filo stesso se si volesse utilizzarlo per creare una f. e. m. indotta. Per ricercare la direzione della corrente o del movimento nel filo si dovrebbe quindi applicare la regola di Fleming delle tre dita (parag. 68) ma colla mano sinistra, invece della destra.

I motori elettrici a corrente continua hanno la stessa ed identica struttura delle dinamo; in essi abbiamo quindi un anello o un cilindro di ferro lamellare girevole *sul quale sono stesi dei fili* collegati secondo uno qualsiasi dei sistemi di avvolgimento che furono esaminati per le dinamo. Ogni filo

si trova perpendicolare al flusso ed essendo legato al nucleo e percorso da corrente tende a far girare il nucleo stesso, tagliando le linee di forza.

L'attitudine che hanno in generale tutti i generatori di corrente elettrica a diventare motori elettrici quando (invece di dare corrente consumando energia) ricevono corrente dando energia meccanica si dice *di riversibilità*. (Vedere parag. 122).

Per la legge generale della induzione elettromagnetica quando un motore è in rotazione i fili d'armatura tagliando le linee di forza diventano sede di una f. e. m. indotta precisamente come se appartenessero ad una dinamo e perciò hanno un'azione contrastante il movimento. Quando si parla di motori è quindi più razionale chiamare la f. e. m. indotta nei fili d'avvolgimento *forza controelettromotrice*.

Chiamando quindi *e* la *forza controelettromotrice*, R la resistenza del circuito indotto, I l'intensità, E la *tensione applicata ai morsetti delle spazzole*, si avrà pei motori:

$$E = e + R\,I$$

Moltiplicando per I entrambi i termini si ha:

$$E\,I = e\,I \times R\,I^2$$

cioè la potenza assorbita da un motore è uguale alla forza contro elettromotrice moltiplicata per l'intensità più la perdita per effetto Joule nell'indotto.

Se *n* è il numero dei giri al minuto primo e C il momento della coppia di rotazione, la potenza W resa in *Kgm* è data da:

$$W = 2\,\pi\,C\,\frac{n}{60} \quad \text{Kgm al 1"}$$

Ma W è uguale approssimativamente ad *eI* : 9,81 (poichè 1 Kgm = 9,81 watt). Sostituendo:

$$W = \frac{e\,I}{9{,}81} = 2\,\pi\,C\,\frac{n}{60}$$

Ma, conformemente a quanto fu dimostrato al parag. 131 la f. e. m. *e* indotta nell'armatura delle dinamo bipolari è espressa:

$$e = \frac{N \times n \times \Phi \times 10^{-8}}{60} \qquad (1)$$

dove N è il numero dei conduttori alla superficie dell'indotto n il numero giri al 1'. Sostituendo nella formola precedente avremo:

$$\frac{N \times n \times \Phi \times I \times 10^{-8}}{9{,}81 \times 60} = \frac{2\,\pi\, n\, C}{60}$$

da cui:

$$C = \frac{N \times \Phi \times I \times 10^{-8}}{2\,\pi \times 9{,}81} = \frac{N \times \Phi \times I \times 10^{-8}}{61{,}5} \text{ Kgm} \qquad (2)$$

formola che serve a trovare pei motori la relazione fra la coppia ed il campo magnetico. Si deduce che la coppia è proporzionale al prodotto $\Phi \times I$.

Dalla formola (1) si cava:

$$n = \frac{e \times 60}{N \times \Phi \times 10^{-8}} \text{ giri al 1'} \qquad (3)$$

in cui:

$$e = E - R\,I$$

formola che serve a calcolare il numero dei giri dei motori bipolari, ed a rendersi conto come varia n al variare di C, N, Φ.

I motori a corrente continua, come le dinamo possono essere ad *eccitazione in serie, in derivazione, compound* ed *indipendente.*

Come si è detto diffusamente parlando della reazione di indotto nelle macchine elettriche l'azione del flusso magnetico di armatura nei motori è tale da rinforzare il flusso induttore; aumentando Φ per la formola (3) la velocità diminuisce; cioè i motori in serie caricandosi corrono meno.

175. Comportamento dei diversi tipi di motori. — I motori in serie, in derivazione e compound hanno un diverso comportamento al variare del carico ed allo avviamento; hanno pure facoltà di frenatura diversa. L'azione di frenatura si sviluppa nei motori quando passano allo stato di dinamo.

Per esaminare come variano il numero dei giri e la coppia di avviamento di un motore in relazione al carico ci riferiremo alle formole (1) (2) e (3) del paragrafo precedente.

Motori in serie. In questi motori il flusso è una funzione della corrente I; con larga approssimazione si può dire che il flusso Φ è proporzionale ad I. Ora se il motore è inserito sopra una rete a tensione costante, essendo E assai prossima a *e*, dalla formola (3) si desume che quando il carico (cioè la corrente I) è piccolo il numero di giri *n* diventa grande. La velocità dei motori a vuoto diventa grandissima e pericolosa.

Crescendo I il flusso Φ aumenta e quindi *n* si abbassa. Perciò la velocità dei motori in serie da carico zero a carico massimo va abbassandosi; la caratteristica della velocità in funzione della intensità è discendente.

La coppia di avviamento è proporzionale, per la formola (2) a $\Phi \times I$: cioè, grossolanamente al quadrato di I. Quindi si deduce che questi motori all'avviamento hanno una coppia molto forte.

I motori in serie avendo velocità inversamente proporzionali al carico e forte coppia di avviamento sono molto indicati per azionare gru e per la trazione elettrica.

Osserviamo che se I fosse mantenuto costante *n* sarebbe proporzionale ad *e*.

Motori in derivazione. Questi motori inseriti sopra una rete di distribuzione a tensione costante hanno la corrente di eccitazione invariabile e perciò anche il flusso costante; allora per la formola (3), essendo Φ costante ed *e* quasi costante, il numero dei giri *n* sarà costante, per quanto lo possa permettere la reazione d'armatura e le dispersioni di flusso.

La caratteristica della velocità in funzione della intensità è in gran parte una retta quasi orizzontale. Praticamente la caduta di velocità da carico zero a carico massimo è piccola e nei limiti dal 3 al 6%.

La formola (3) ci insegna altresì che se noi inseriamo una resistenza in serie sul circuito del campo magnetico il flusso Φ si riduce e quindi *n* aumenta. Da ciò un modo per regolare la velocità dei motori in derivazione sulle reti a tensione costante. Aumentando la resistenza col reostato inserito sulla de-

rivazione di campo il motore accelera, diminuendo la resistenza il motore ritarda.

La coppia di questi motori è proporzionale ad I e ad *e*. Ora all'avviamento, la forza contro elettromotrice *e* è quasi zero; perciò la corrente I può diventare pericolosa; ma, se il campo è eccitato a pieno, la coppia è massima ma limitata dal valore della corrente di eccitazione e cioè dal valore di E.

I motori in derivazione sono i più diffusi per le applicazioni ordinarie.

Motori compound. I motori compound, poco usati, possono essere di due tipi: *a) tipo differenziale* nel quale la corrente di eccitazione in serie è tale da contrastare il campo dato dall'eccitazione in derivazione; *b) tipo addizionale* nel quale la corrente in serie del campo tende a rinforzare quella del circuito in derivazione.

Nel primo tipo l'eccitazione in derivazione si mantiene costante; ma, come si è visto, aumentando il carico la velocità tenderebbe a diminuire. L'eccitazione in serie invece, aumentandosi gli ampère, tende a indebolire il campo magnetico e quindi a far correre di più il motore. Se l'azione dell'eccitazione in serie, contraria a quella dell'eccitazione in derivazione, è calcolata in modo da compensare la reazione d'armatura e la caduta ohmica nell'avvolgimento, la *velocità rimane assolutamente costante a qualunque carico,* purchè sia mantenuta costante anche la tensione applicata ai morsetti.

Vi è però il pericolo che, se al motore venisse interrotta o indebolita troppo l'eccitazione in derivazione, la velocità della macchina potrebbe assumere un valore eccessivo e pericoloso, perchè il motore funzionerebbe come motore in serie.

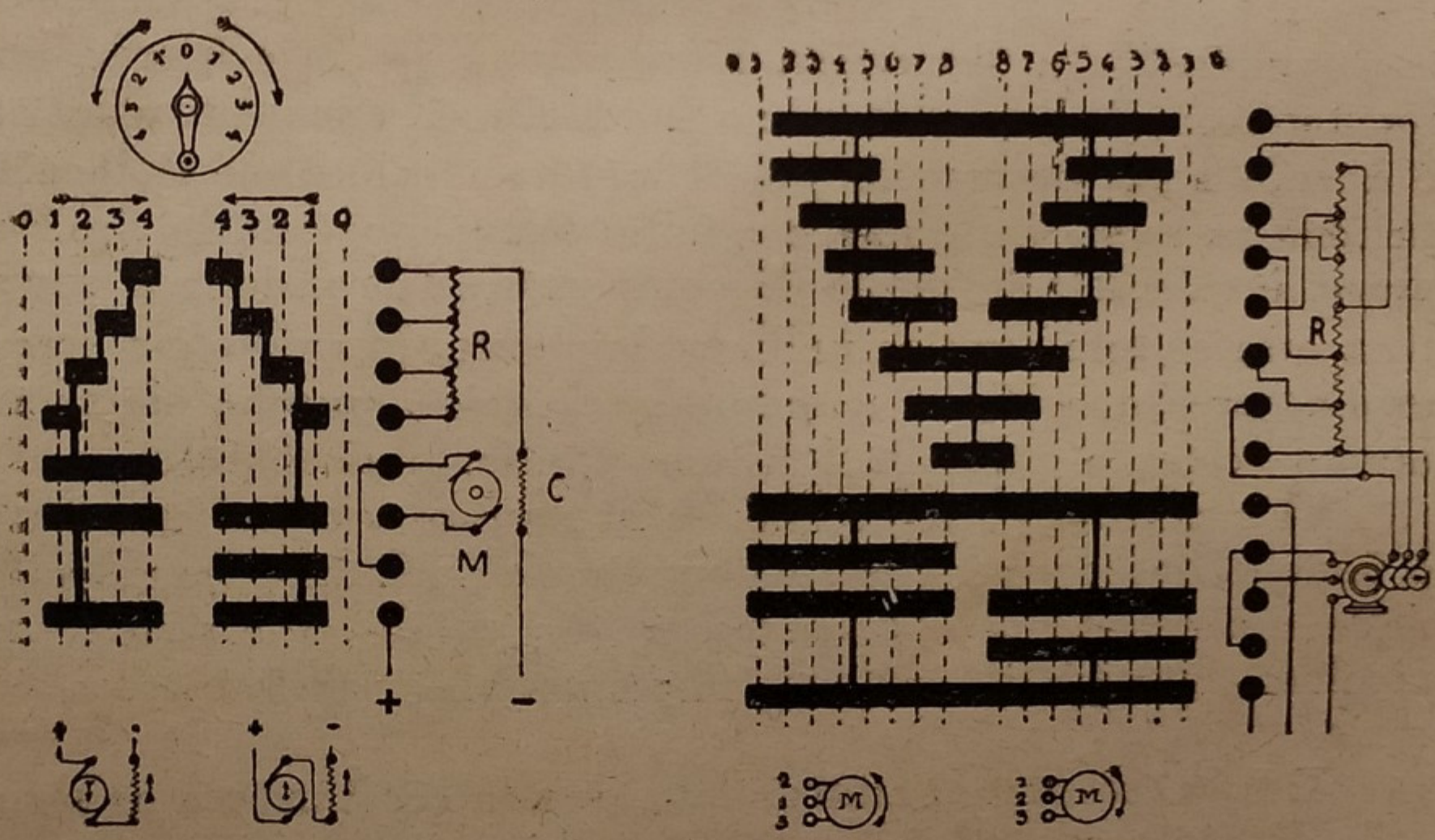
Il tipo compound addizionale avendo l'eccitazione in serie tale da rinforzare il campo dal circuito d'eccitazione in derivazione, tende ad assumere, in piccola misura, il carattere di un motore in serie. Perciò questi motori hanno una caduta sensibile di velocità da carico zero a carico massimo ma una coppia molto forte d'avviamento.

Si dicono *curve caratteristiche* dei motori le curve che si ottengono portando sopra un asse di ascisse l'intensità della

corrente e sopra le ordinate il numero dei giri corrispondente; oppure portando per ordinate i watt assorbiti o forniti.

176. Inversione del senso di rotazione. - Azione frenante dei motori. — Se si invertono gli attacchi dei fili del circuito ai morsetti di un motore in serie od in derivazione, il senso di rotazione rimane invariato.

Per invertire il senso di moto dei motori a c. c. bisogna invertire il campo magnetico oppure la corrente nella armatura. La inversione della rotazione dei motori si ottiene quindi scambiando gli attacchi di estremità del circuito di eccitazione del campo oppure i fili che si attaccano alle spazzole. Quando si devono azionare macchine che richiedono frequenti inversioni di moto (verricelli, gru, ecc.) per invertire la corrente si adoperano dei commutatori a rotazione detti *controller*, come quelli che si trovano sulle vetture dei tram. (Fig. 342-343).



Figg. 342 - 343 - Schema di controller per motore in serie e per motore trifase.

L'inversione di moto nei motori si fa di preferenza sul circuito di indotto poichè, commutando quella d'eccitazione del campo, si corre il pericolo di sovratensioni e di scintille forti di extra corrente ai contatti del commutatore. Inoltre

l'inversione del magnetismo nei grossi pezzi polari dell'induttore è tarda e lenta. Invece l'inversione della corrente d'armatura, essendovi in tal caso minor selfinduzione, riesce più rapida e con minor scintille ai contatti del commutatore.

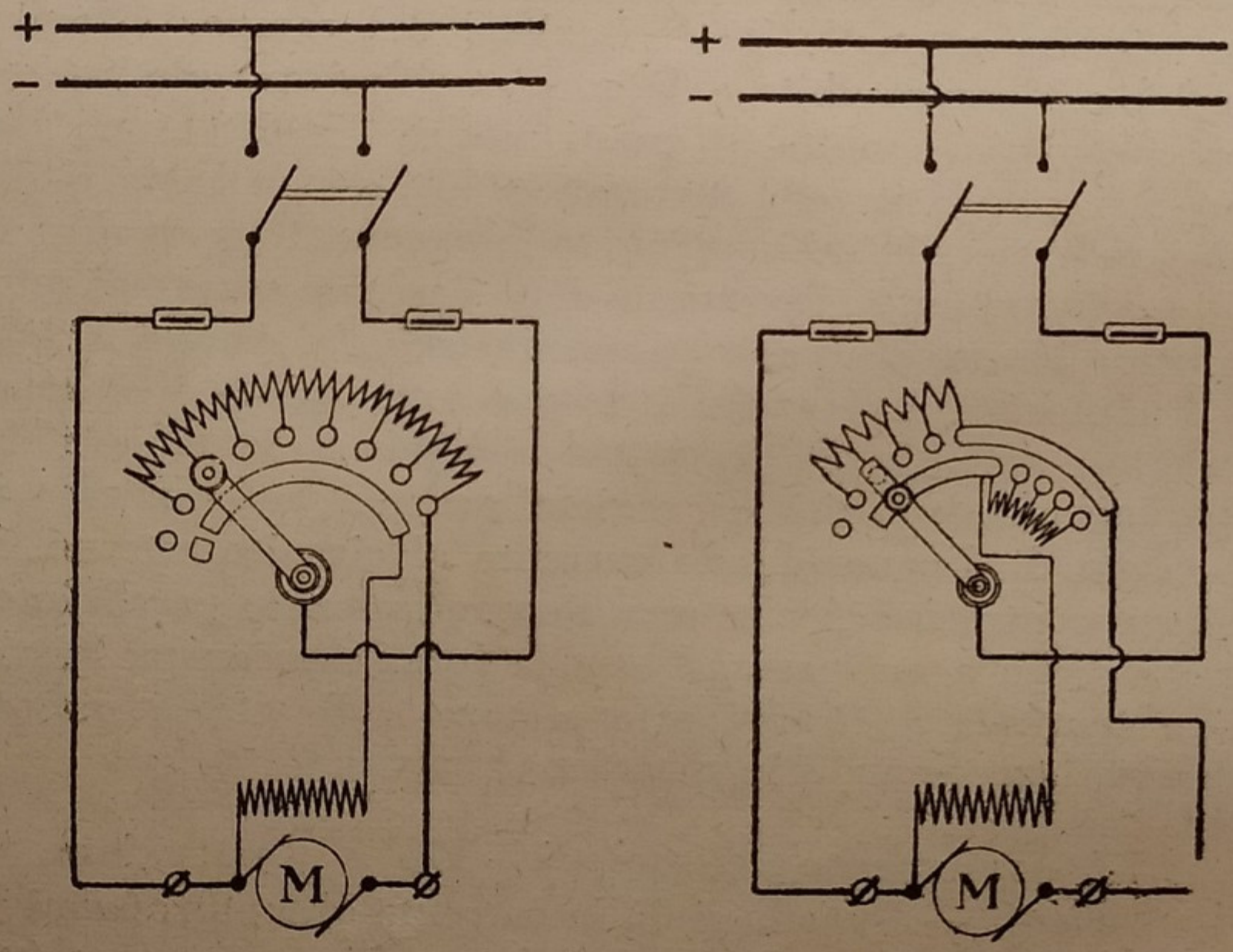
Se invece di svolgere energia meccanica un motore fosse sollecitato a girare più velocemente da una forza meccanica estranea, si dice che il motore vien soggetto a *un carico negativo*. *Un motore in serie* girando nello stesso senso, soggetto a carico negativo prende una grande velocità senza svolgere azione di freno. Per far sì che tale motore possa passare allo stato di dinamo generatrice, ossia di freno, assorbendo forza meccanica per dare corrente alla linea (ricupero) o ad una resistenza, occorre di invertire il senso di corrente dell'armatura rispetto a quello di eccitazione del campo. Allora la macchina si eccita subito e dà corrente. Così quando una vettura tramviaria, munita di questi motori deve fare una forte discesa, i motori devono lavorare come freni o come ricuperatori dell'energia; alla manovra provvede il *controller* col quale si fa appunto l'inversione della corrente che va al rotore lasciando intatto il circuito di eccitazione del campo in serie.

I motori in derivazione invece si comportano diversamente: spinti da un carico negativo con una velocità del 5-8% superiore alla velocità di regime passano automaticamente allo stato di dinamo dando corrente al circuito esterno. Sta anche il contrario: cioè se una dinamo lavora in parallelo con altre e viene a mancare ad essa la forza meccanica, la macchina contipua a girare come motore, collo stesso senso di rotazione, trascinando la macchina motrice.

177. Avviamento dei motori. - Tipi e costruzione degli avviatori. — Quando si dà la corrente ai motori fermi per farli avviare, essi non offrono alcuna forza contro elettromotrice, ma solo la piccola resistenza ohmica della armatura. Onde la corrente si inizia con un valore molto alto (da 20 a 100 volte) e se l'inerzia della massa ruotante che fa corpo coll'armatura (massa dell'armatura, volanti, pulegge, trasmissioni, macchine operatrici ecc.) è tale da impedire un rapido avviamento, si corre il pericolo di un forte riscaldamento ed abbruciamento dei fili d'avvolgimento per eccesso di corrente. Ad ovviare questo pericolo e per poter graduare la corrente

impedendo che si formi intensità eccessiva alla messa in moto dei motori, si devono inserire nel circuito di alimentazione dei *reostati* formati da resistenze ohmiche regolabili a mano od automaticamente. Queste resistenze vengono inserite allo avviamento, allorchè si chiude il circuito di alimentazione del motore, ma poi, mano mano che la velocità aumenta esse vengono disinserite. Raggiunta la massima velocità i reostati restano completamente esclusi od in corto circuito.

Tutti gli apparecchi di avviamento dei motori devono essere costruiti in modo che, allorchè si chiude il circuito di alimentazione dei motori *il circuito di campo abbia a ricevere per primo la corrente* in modo che si possa formare subito il flusso induttore. Con ciò si assicura al motore la pos-



Figg. 344 - 345 . Schema di inserzione di avviatori per motori a corrente continua.

sibilità di una energica coppia di avviamento, altrimenti se il campo magnetico fosse debole l'avviamento riuscirebbe stentato.

Nelle figure 344-345 sono rappresentati due schemi di *avviatori* per motori in derivazione, ma altri si possono immaginare per riuscire allo scopo.

Nella prima figura è rappresentato uno schema di avvia-

tore semplice; nella posizione di riposo il manubrio del reostato sta coricato a sinistra. Appena si dà la corrente chiudendo l'interruttore e spostando il manubrio si osserva che il campo viene eccitato a piena tensione, mentre la corrente che va nell'armatura deve passare per tutta la resistenza. Avviato il motore si porta adagio adagio il manubrio verso destra finchè tutta la resistenza resta disinserita.

Nella seconda figura vi è uno schema di avviatore un po' più complesso per grossi motori; esso porta dei contatti per variare la resistenza inserita nel campo magnetico e quindi regolare la velocità.

Per fermare un motore in derivazione bisogna sempre o interrompere la corrente mediante l'interruttore generale oppure disinserire prima l'armatura e poi il campo; negli avviatori l'inserzione del campo e la disinserzione è studiata in modo che non possono succedere degli errori nella sequenza delle manovre.

Se all'arresto del motore venisse disinserito il circuito induttore prima di aprire il circuito di alimentazione che si attacca ai morsetti, non essendovi più flusso nei magneti, cesserebbe ogni forza contro elettromotrice ed istantaneamente la corrente aumenterebbe di tanto da far fondere le valvole o da far bruciare il motore.

I reostati si costruiscono con spirali di filo di metalli o leghe aventi forte resistività; le spirali si ottengono avvolgendo i fili sopra ferri tondi al tornio. Le spirali vengono fissate sopra telai di ferro e vengono poi munite di una tastiera di contatti con manubri. (Fig. 346). Si usa anche di avvolgere le spirali sopra tubi di porcellana portanti una rigatura a spirale.

Vi sono anche reostati formati da spirali immerse in un recipiente di olio minerale; l'olio avendo un calore specifico maggiore dell'aria ed essendo più conduttivo del calore lo assorbe rapidamente mano mano che si svolge nelle spirali di resistenza.

Si ammette che la temperatura massima delle spirali sia di 200°; per quelle avvolte su porcellana 300°. Come materiali si adoperano fili di nichelina, di argentana, di ferro.

La intensità della corrente I nei reostati si calcola colla formola:

$$I = K\, d \sqrt{d}$$

dove d è il diametro dei fili in mm.; K un coefficiente che si può ritenere di 12 a 15 per i fili d'argentana o nichelina: 20 a 25 per il ferro.

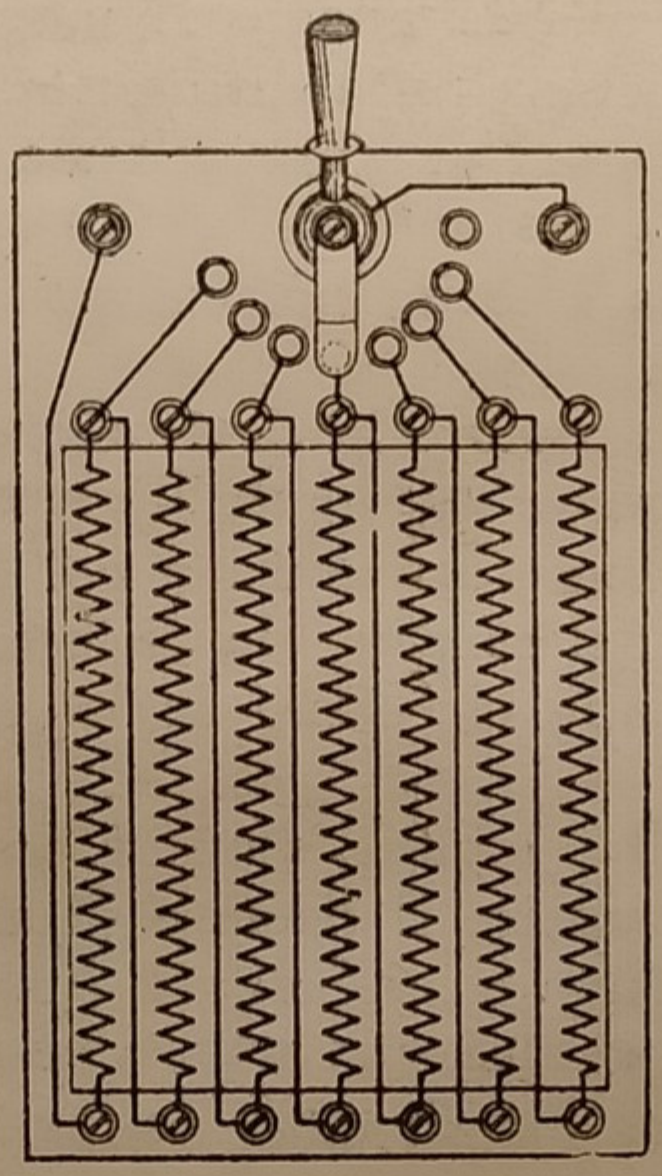


Fig. 346 - Reostato a manubrio.

Si usano pure reostati formati da striscie di ghisa sottile piegata come un nastro a greca o a zig-zag; reostati formati da pezzi di carbone compresso di alta resistenza; reostati a liquido formati da recipienti contenenti soluzioni di bicarbonato di soda o di altri sali inerti e con delle lastre di ferro immerse. Per corrente continua quest'ultimo tipo è poco raccomandabile perchè le lastre di ferro si corrodono per effetto di elettrolisi.

178. Regolazione della velocità dei motori. — La formola (3) del paragrafo 174 ci insegna che se la tensione si mantiene costante, la velocità è inversamente proporzionale al flusso. Cioè eccitando di più il campo magnetico la velocità dei motori diminuisce; indebolendo, la velocità aumenta. Nei motori in derivazione queste variazioni si ottengono con dei

reostati inseriti in serie sul circuito di eccitazione. Nei motori in serie invece si mettono in derivazione tra gli estremi dello stesso circuito.

Col sistema di regolazione della velocità mediante reostato di campo non si possono ottenere variazioni maggiori del 25 al 30 per cento della velocità media perchè diminuendosi molto l'eccitazione si indebolisce molto il flusso induttore e quindi la coppia torcente; la reazione di armatura assume una grande preponderanza.

Un secondo sistema per variare il numero dei giri di un motore consiste nel far variare la tensione ai morsetti dell'armatura inserendo o disinserendo delle resistenze mediante lo stesso reostato di avviamento. Questo sistema fa perdere po-

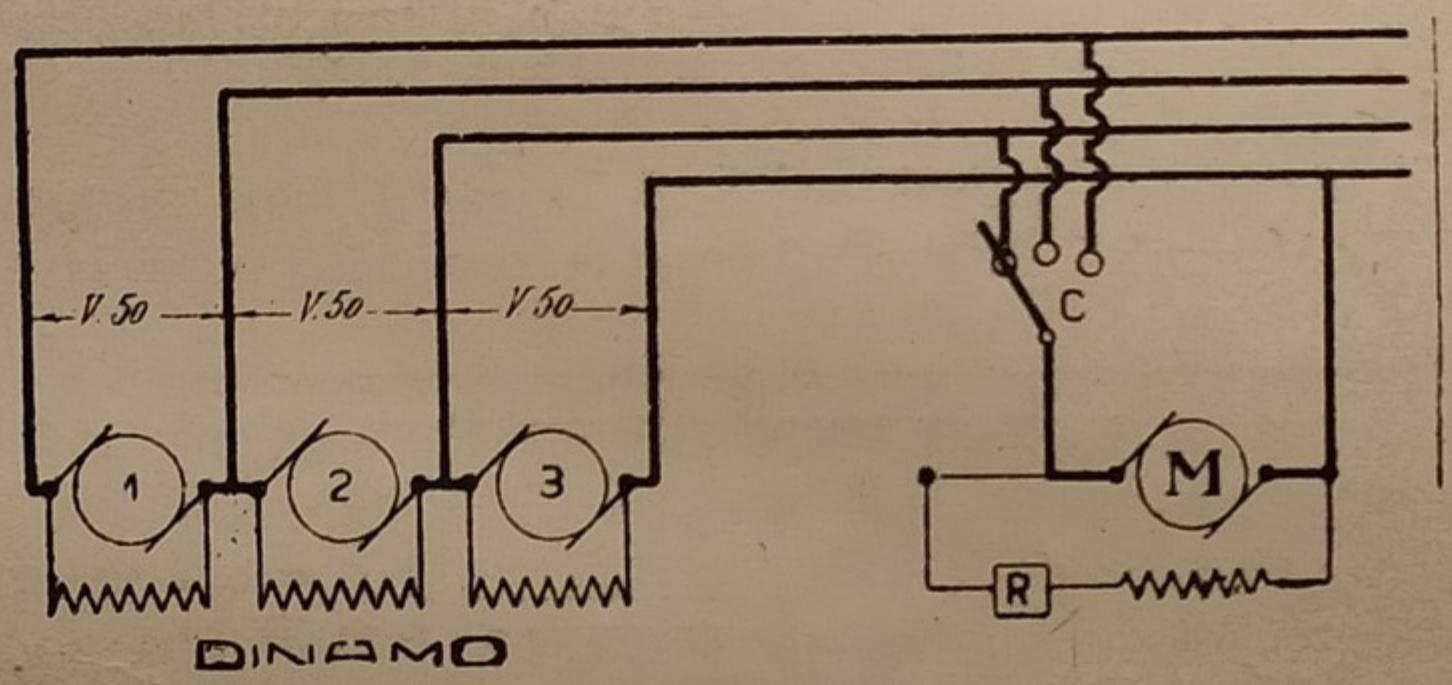


Fig. 347 - Metodo per ottenere grande variazione di velocità in un motore M a corrente continua.

tenza ai motori ed è di pessimo rendimento perchè buona parte dell'energia viene sciupata in calore nel reostato.

La variazione del campo magnetico induttore dei motori in serie si può ottenere anche suddividendo il circuito di eccitazione in diverse sezioni e raggruppando queste sezioni in parallelo, in serie, in serie parallele, ecc. mediante *controller*.

In certi stabilimenti ove occorre di avere motori a forti variazioni di velocità e coppia costante (macchine per la stampa di tessuti, macchine per la fabbricazione della carta, laminatoi di metalli, ecc.) si ottiene lo scopo voluto, mediante dinamo disposte in serie, e a diverse tensioni. In questo caso come è illustrato dalla fig. 347, vi sono tre dinamo da 50 Volt ciascuna, accoppiate in serie fra loro; una linea a 4 fili ali-

menta i motori. Ogni motore è provvisto di un commutatore C col quale si può inserire il motore su 50 V. oppure su 100 V. oppure su 150 V. Il motore è provvisto altresì del regolatore R di campo col quale si può per ogni gradino di tensione variare la velocità entro limiti del 10-20%. Con questo sistema si possono far variazioni di velocità nel rapporto da 1 a 4.

Regolazione Leonard. Accenneremo infine ad un ultimo sistema di regolazione della velocità pei motori grandi che azionano gli ascensori nelle miniere, pei treni laminatoi delle ferriere ecc.; esso è abbastanza diffuso all'estero. Con questo sistema si può ottenere una variazione di velocità entro larghissimi limiti, l'inversione di moto e la frenatura od il ricupero dell'energia quando il motore è sottoposto a carico negativo.

Col sistema Leonard o Ward Leonard ogni motore M (fig. 348) è munito di una dinamo generatrice propria D la

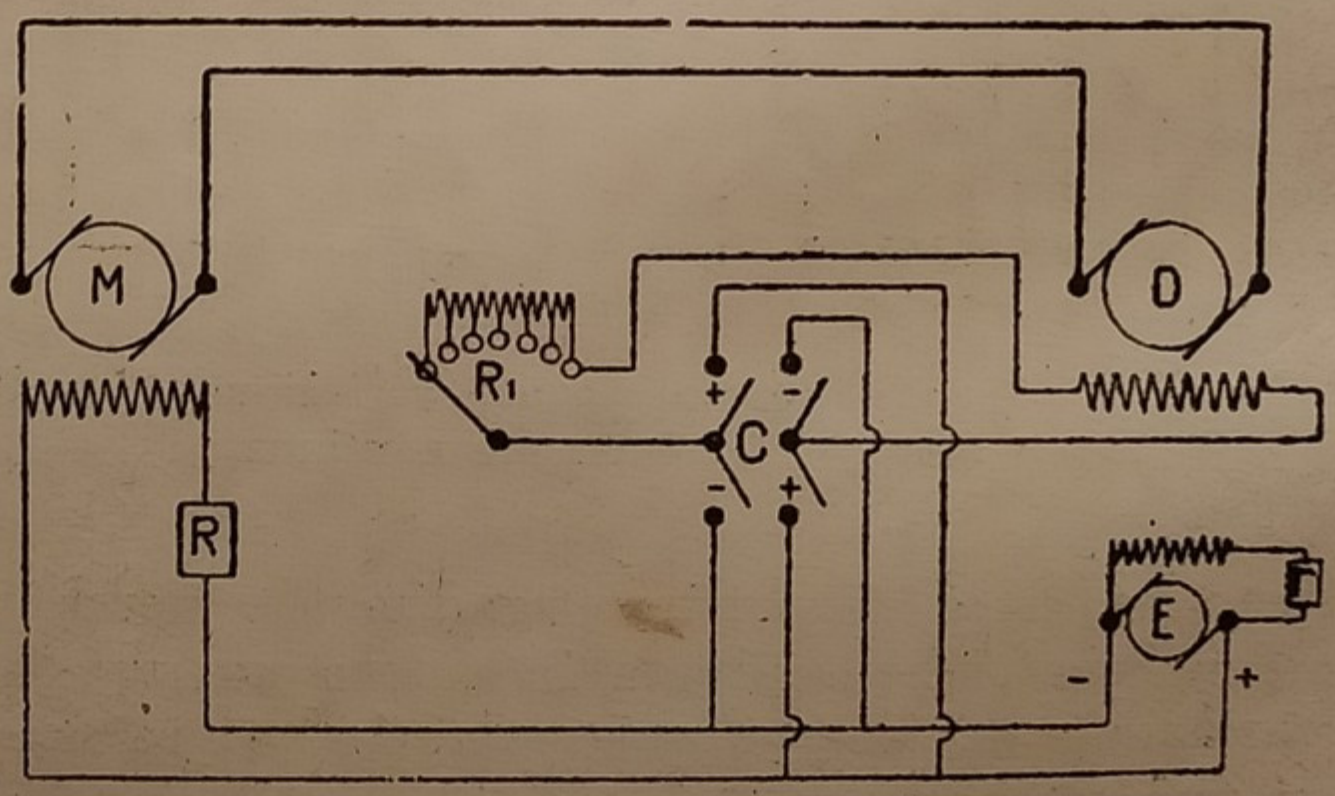


Fig. 348 - Schema di una installazione di motore a forte variazione di velocità sistema Ward Leonard.

quale è azionata alla sua volta o da macchine a vapore o da motori trifasi. La regolazione di velocità del motore M si fa interamente con un reostato R_1 tenuto dal manovratore col quale egli regola il campo della dinamo D. Sia l'eccitazione di campo del motore M che della dinamo D è data dalla corrente di una piccola eccitatrice separata E. Vi è poi un com-

mutatore C col quale si può invertire il campo della dinamo D e quindi invertire la rotazione del motore M. Quando al motore M essendo caricato di una certa coppia passiva, si diminuisce la tensione all'armatura, allora il motore si mette a girare in senso contrario funzionando da dinamo e cioè con ricupero di energia. Ciò succede quando il motore comanda la discesa di un grosso peso o di un grosso ascensore. Il sistema Leonard che noi abbiamo appena accennato schematicamente è completato con parecchi dispositivi mediante i quali si possono fare manovre di grandi ascensori colla più perfetta sicurezza e precisione di movimenti.

179. Motori a corrente alternata. — I motori a corrente alternata si distinguono in:

1.° *Motori sincroni* tanto monofasi che polifasi.

2.° *Motori asincroni* tanto monofasi che polifasi.

I motori sincroni non sono altro che alternatori i quali invece di creare corrente, ricevono dal circuito esterno l'energia elettrica e la trasformano in energia meccanica. Dunque i motori sincroni hanno bisogno di eccitatrice a c. c.

I motori asincroni invece sono motori in cui tanto nell'induttore che nell'indotto vi sono delle correnti alternate

I motori sincroni hanno una velocità esattamente fissata dalla formola:

$$n = \frac{120 \times f}{p} \quad \textit{(velocità di sincronismo)}$$

dove n è il numero dei giri al minuto primo; f è la frequenza; p il numero dei poli. La velocità quindi di questi motori è esattamente proporzionale alla frequenza.

I motori asincroni possono invece avere velocità differente da quella di sincronismo.

180. Motori sincroni e loro funzionamento. — La costruzione dei motori sincroni non è per nulla diversa da quella degli alternatori. Se ad un alternatore in parallelo con altri viene a mancare la forza meccanica che lo mette in

azione, esso passa automaticamente allo stato di *motore sincrono* senza alterare minimamente la sua velocità e può servire per muovere altre macchine. Tutto quanto abbiam detto per gli alternatori in riguardo alla costruzione, avvolgimenti, comportamento, numero di giri in rapporto alla frequenza e numero dei poli ecc.; vale anche per i motori sincroni.

Per capire il funzionamento di questi motori in riguardo all'azione del flusso magnetico indotto sull'induttore ci riferiamo a quanto abbiamo spiegato nel parag. 152.

Riferendoci alla fig. 349, supponiamo che un alternatore passi allo stato di motore sincrono; è evidente che pur essendo di uguale segno la f. e. m. indotta (poichè non è cambiata ai morsetti) la corrente è in ogni istante di segno contrario di quello che sarebbe se la macchina funzionasse come alternatore. Cioè invece di avere, come nelle figure al paragrafo 152, i poli riflessi *n - s - n - s* spostati in avanti di 90° rispetto ai poli omonimi induttori N - S - N - S avremo al loro posto i poli di nome contrario come è indicato nella fig. 349. I poli *n - s - n - s* sono gli eccitatori del moto perchè trascinano i poli N - S - N - S.

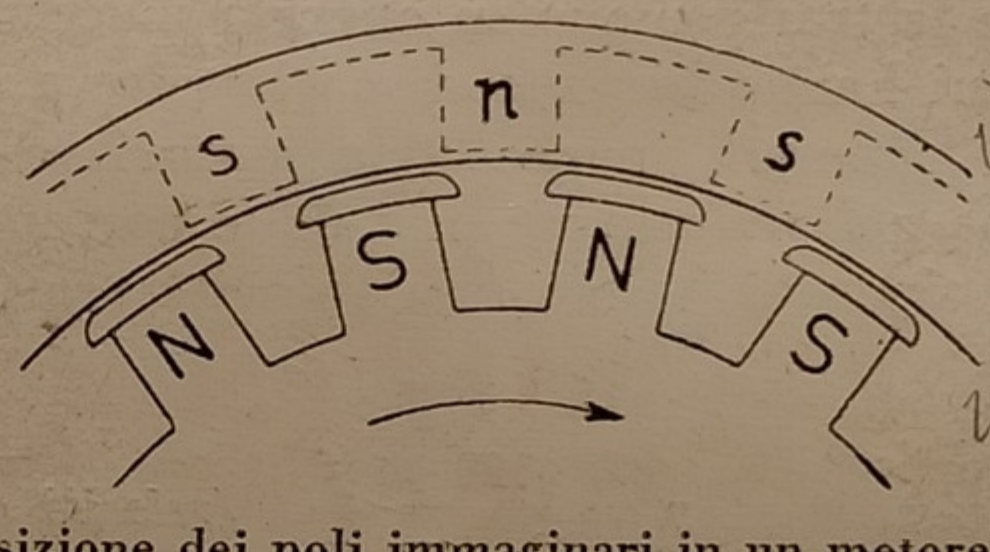


Fig. 349 - Posizione dei poli immaginari in un motore sincrono per corrente in fase colla f. e. m.

In altri termini nei motori sincroni la corrente ha direzione contraria alla f. e. m. indotta; il suo vettore si trova in ritardo di 180° rispetto alla f. e. m. indotta. Nel caso di motori la f. e. m. indotta si dice *forza contro elettromotrice*.

Vediamo ora cosa succede se, variando l'eccitazione del campo induttore, si aumenta o si diminuisce il flusso magnetico dei poli. Se si aumenta il flusso in modo che la forza contro elettromotrice E diventa maggiore della tensione applicata ai morsetti V, si forma una corrente Io dovuta alla

differenza fra le due f. e. m. E — V. La corrente *Io* è una corrente svattata o inattiva e precisamente a 90° in anticipo rispetto a V; essa tende (componendosi colla corrente attiva consumata dal motore) a spostare in avanti i poli riflessi *n - s - n - s* - in modo che questi tendono a smagnetizzare i poli N - S - N - S della fig. 349.

Viceversa se si indebolisce l'eccitazione dei poli induttori si forma una corrente Io in ritardo rispetto a V la quale fa spostare indietro i poli *n - s - n - s* della figura 349 in modo che questi tendono a rinforzare il campo. In conclusione si ha che sovraeccitando il campo induttore di un motore sincrono la corrente consumata aumenta perchè si aggiunge la componente svattata Io, inoltre essa riesce spostata in avanti rispetto alla f. e. m. applicata ai morsetti. Quando la corrente ha la minima intensità allora la corrente assorbita dal motore è completamente attiva ossia cos $\varphi = 1$.

Il fenomeno si dimostra con la curva a V illustrata al paragrafo 156 e che si riporta colla fig. 350.

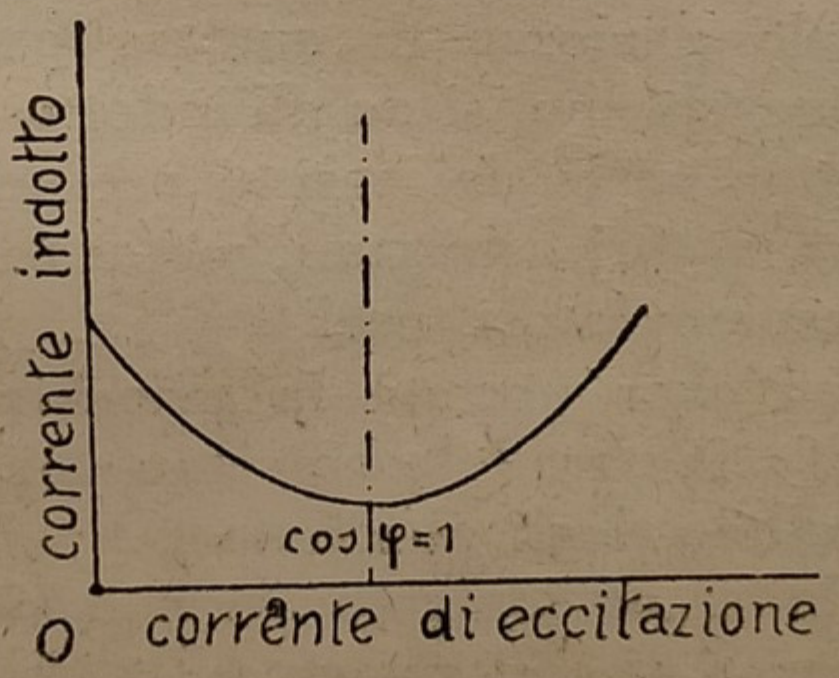


Fig. 350 . Curva a V dei motori sincroni.

Dalla esposizione di questi fatti risulta che i motori sincroni possono creare corrente in ritardo o in anticipo a seconda che sono poco eccitati o sovraeccitati. In quest'ultimo caso si comportano come condensatori e servono a correggere il fattore di potenza delle linee o reti di distribuzione dell'energia elettrica nelle quali di solito la corrente è in ritardo di

fase rispetto alla tensione. I motori sincroni applicati per lo scopo suddetto si dicono *condensatori sincroni*.

181. Avviamento dei motori sincroni. — I motori sincroni non si avviano da soli chiudendo il circuito esterno poichè la coppia d'avviamento è debolissima. Se le espansioni polari sono massicce, allora nell'avviamento si formano sulle facce polari delle correnti di Foucault e quindi dei flussi di reazione che possono mettere in moto la corona o stella dei poli. Per ottenere un maggior effetto le espansioni polari vengono munite di grossi anelli di ferro o sbarre di rame i quali diventano sede di intense correnti indotte all'avviamento, di modo che la macchina può avviarsi abbastanza rapidamente. Le espansioni polari si fanno allora di ferro lamellare. Talvolta tali espansioni vengono munite di un vero avvolgimento a sbarre come quello dei motori asincroni a gabbia di scoiattolo. In tal caso l'avviamento riesce forte; per limitare con questo sistema la intensa corrente iniziale, si alimenta lo statore con una tensione ridotta alla metà circa della normale a mezzo di autotrasformatore. Raggiunta la velocità di sincronismo, si da all'indotto la piena tensione.

Nella maggior parte dei casi si preferisce avviare questi motori con altri motori asincroni, motori a corrente continua alimentati da accumulatori, ecc.

Allora dopo aver portata la macchina alla velocità di sincronismo si fa il parallelo con uno dei metodi già esaminati per il parallelo degli alternatori.

Nel periodo di avviamento, se non si ricorre ai motori ausiliari, il circuito di eccitazione della ruota dei poli si deve mantenere aperto, perchè in esso si formano tensioni alte e talvolta pericolose per gli isolanti. L'arresto si fa interrompendo la corrente alternata di alimentazione.

182. Motori asincroni. — I motori asincroni comuni o ad induzione sono fondati sul principio del *campo rotante* di cui abbiamo parlato al parag. 96. A differenza dei motori sincroni che ruotano con la velocità di sincronismo data dalla formola:

$$\text{giri al } 1' = \frac{120 \times \text{frequenza}}{\text{poli}}$$

i motori asincroni ruotano con una velocità leggermente inferiore dall'1 al 6%.

I motori asincroni sono formati da due parti:

1.° Lo *statore* o parte fissa costituita da un anello di ferro lamellare, come gli indotti degli alternatori con delle scanalature verso la superficie interna nelle quali sono allogate le matasse. *Gli avvolgimenti sono dello stesso tipo di quelli già descritti per gli alternatori e cogli stessi schemi.*

2.° Il *rotore* o parte mobile, formato da un cilindro od anello di ferro lamellare con delle scanalature verso la superficie esterna nelle quali sono messi pure degli avvolgimenti a matasse od a sbarrette dello stesso tipo di quelli descritti per gli alternatori e *per un numero di poli uguale a quello fissato per lo statore.*

Generalmente gli avvolgimenti statorici sono quelli che ricevono la corrente dall'esterno; quelli rotorici formano circuito a sè, e durante il funzionamento *sono mantenuti in corto circuito.*

Oltre a questi tipi di avvolgimento, per piccoli motori si adopera anche un sistema detto a *gabbia di scoiattolo* e formato da sbarrette di rame tonde messe nelle scanalature del nucleo di ferro ed unite alla estremità da due anelli di rame.

Gli avvolgimenti dei rotori si distinguono in due tipi: *chiusi in corto circuito* ed *aperti*. Nei primi le estremità dell'avvolgimento sono sempre chiusi in corto circuito. Il rotore a gabbia di scoiattolo è di tipo chiuso.

Gli avvolgimenti rotorici di tipo aperto sono a stella fanno capo a tre anelli sui quali appoggiano delle spazzole di carbone grafitico. Le spazzole sono poi messe in comunicazione con un *reostato* col quale si può regolare la corrente indotta nel rotore, nel periodo di avviamento.

Però una volta avviato il motore i tre anelli sono chiusi in corto circuito.

Quasi tutti i motori asincroni ad induzione con anelli sono muniti di un dispositivo meccanico col quale si può met-

tere in corto circuito gli anelli ed alzare contemporaneamente le spazzole e ciò per evitare, durante il regolare funzionamento, una perdita di energia dovuta allo sfregamento delle spazzole e un inutile corrosione degli anelli.

L'avvolgimento del rotore di un motore trifase può essere anche bifase o viceversa; ciò non ha importanza perchè il circuito dello statore e quello del rotore sono completamente separati ed indipendenti; quello dello statore riceve la corrente dall'esterno; quello del rotore deve rispondere solo alla condizione che le correnti indotte debbono poter formare tanti poli magnetici quanti ne crea lo statore.

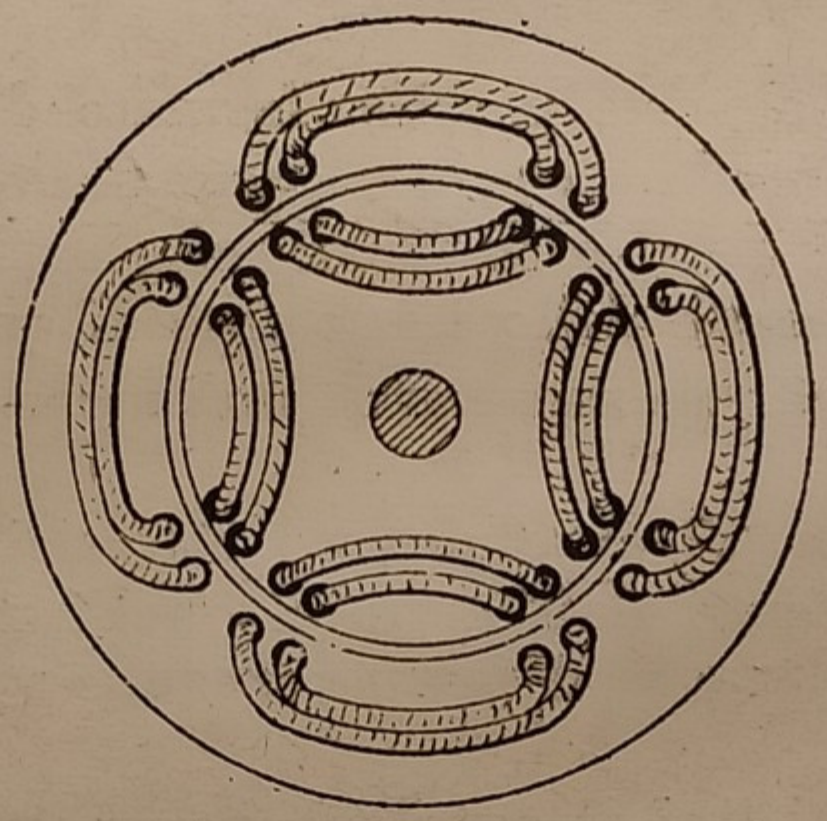


Fig. 351 - Schema delle matasse di un motore bifase.

La fig. 351 rappresenta schematicamente la sezione di un motore bifase qualunque cogli avvolgimenti dello statore e del rotore.

Tra lo statore ed il rotore si lascia un piccolissimo interferro, di $^1/_2$ a 1 mm.

183. Funzionamento dei motori asincroni. — Essendo l'avvolgimento dello statore fatto come quello degli alternatori ed essendo alimentato da corrente polifase (generalmente bifase o trifase) nell'anello si formerà una corona di poli magnetici risvolti verso l'interno, ruotante colla velocità di sincronismo. (Fig. 352).

Il flusso di questi poli tagliando i fili avrà per effetto di creare nell'avvolgimento del rotore delle correnti indotte le

quali alla loro volta creeranno dei poli magnetici tali da opporsi, per la legge di Lenz, al movimento che producono le correnti stesse. Il rotore si trova obbligato a seguire il movimento del campo ruotante dello statore, e fra statore e rotore si sviluppa una forza proporzionale all'intensità del campo dello statore ed alla corrente indotta nel rotore. (Principio delle azioni elettrodinamiche).

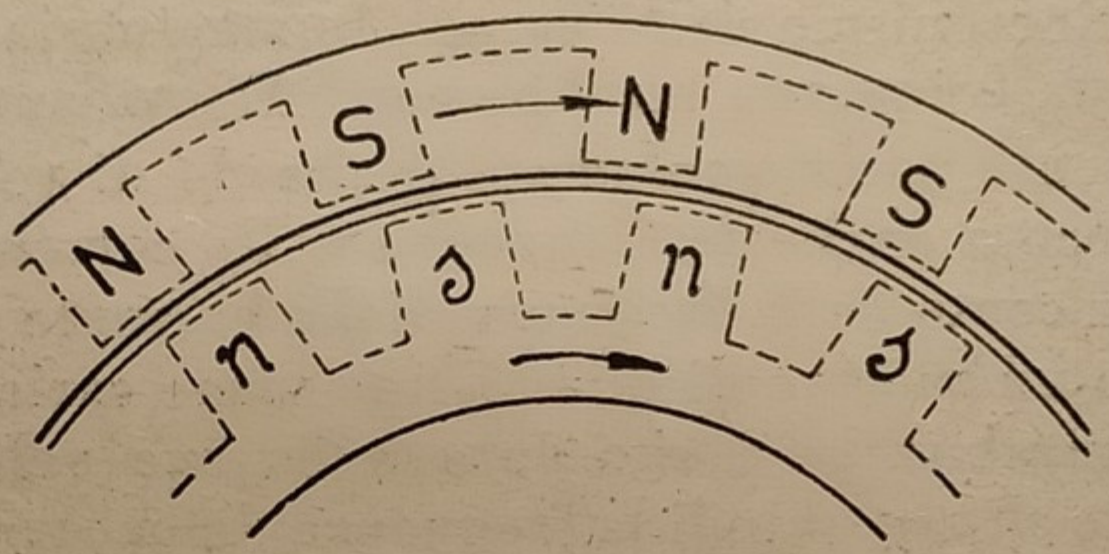


Fig. 352 - Posizione dei poli immaginari nello statore (esterno) e rotore (interno) di un motore asincrono a campo rotante.

Oltre alla coppia succitata vi è anche un'altra piccola coppia data dal trascinamento del nucleo di ferro rotorico per mezzo dei poli statorici ruotanti.

Esaminiamo un motore girante a vuoto. Il rotore sollecitato a girare andrà aumentando la sua velocità, ma non potrà mai raggiungere quella del campo statorico (velocità di sincronismo) perchè se girasse con questa velocità non vi sarebbe più nessun effetto induttivo nell'avvolgimento del rotore. Esso assumerà quindi una velocità leggermente inferiore tanto da mantenere una corrente ed una coppia appena sufficiente per vincere le resistenze di attrito e di ventilazione.

Slittamento o slip dei motori. Il ritardo di velocità che il rotore assume rispetto alla velocità di sincronismo del campo statorico si dice *scorrimento* o *slip* o *slittamento*. Esso è definito esattamente dalla formola:

$$\frac{n - n_1}{n}$$

dove n è il numero di giri del campo dello statore corrispondente alla nota formola:

$$n = \frac{120 \times \text{frequenza}}{\text{numero dei poli}}$$

n, è il numero di giri effettivo del rotore del motore.

La frequenza della corrente indotta nel rotore è uguale alla frequenza della corrente nello statore se il rotore è mantenuto fermo; ma se il rotore si lascia girare, la frequenza andrà diminuendo. Se il rotore potesse girare colla stessa velocità di sincronismo della corona immaginaria di poli dello statore, la sua frequenza sarebbe zero. E' evidente che lo *slip* che rappresenta percentualmente il ritardo di velocità del rotore rappresenta anche la frequenza della corrente nel rotore stesso in per cento della frequenza della corrente nello statore.

Appena un motore di questo tipo viene caricato, il rotore tenderà naturalmente a ritardare nella sua velocità cioè si aumenterà lo *slip*, e quindi la frequenza della corrente indotta. Ma diminuendosi la velocità del rotore l'effetto induttivo del campo statorico sul rotore sarà maggiore, poichè noi sappiamo che la f. e. m. indotta è proporzionale alla velocità di variazione o di taglio del flusso induttore. Aumentando la f. e. m. indotta nei fili del rotore, cresce la corrente, e quindi la coppia motrice. Si stabilirà pertanto una velocità nel rotore ed uno slip tale che la coppia motrice che si crea fra corrente e campo statorico, faccia equilibrio alla coppia resistente applicata all'asse del motore o sulla puleggia.

Aumentandosi la corrente nel rotore, il suo campo indotto (per un processo affatto analogo a quello che succede nei trasformatori) tende a far diminuire la f. e. m. di selfinduzione nel circuito primario ossia nello statore e quindi a richiamare una maggior corrente nello statore stesso.

Confronto coi trasformatori. I motori asincroni condividono coi trasformatori parecchie caratteristiche ove si ritenga lo statore come primario e il rotore come secondario in corto circuito. Differiscono però dai veri trasformatori in questo: 1.° che non hanno il circuito magnetico completamente chiuso ma interrotto da un interferro; 2.° che essendo il primario ed il secondario separati si ha luogo a forte riluttanza e dispersione di flusso. La conseguenza di ciò è che: siccome occorre una forza magnetomotrice (Amp-spire) assai più grande che

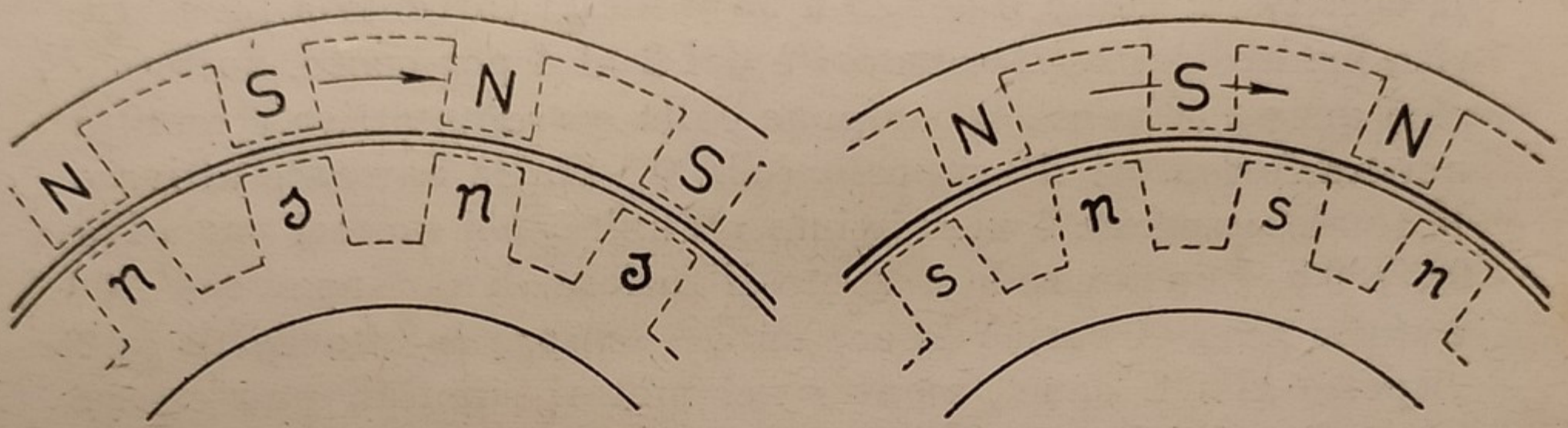
nei trasformatori di pari potenza per creare il flusso e vincere la riluttanza, *i motori asincroni assorbono dal circuito esterno una più forte corrente di magnetizzazione*, tanto più forte quanto è più grande l'interferro. Questa corrente è, come nei trasformatori, a 90° in ritardo rispetto alla f. e. m. ed è quasi costante ad ogni carico. Essa è data quasi esattamente dalla corrente che il motore consuma a vuoto. Negli ordinari motori la corrente a vuoto è del 25 a 35 % della corrente a pieno carico mentre nei trasformatori è del 2 al 4 per cento. Sotto carico questa corrente si compone colla corrente attiva e mentre nei trasformatori il rapporto (cos φ) fra la corrente attiva e la totale assorbita è vicinissimo all'unità, nei motori varia fra 0,8 e 0,9. Funzionando a vuoto il fattore di potenza (cos φ) è quasi zero. A carico la corrente è *sempre* in ritardo di fase rispetto alla f. e. m., mentre nei motori sincroni può essere anche in anticipo.

Come nei trasformatori: se la tensione applicata ai morsetti è costante, i flussi magnetici sono di intensità costante. La tensione secondaria (ossia del rotore) è come nei trasformatori quasi in opposizione alla f. e. m. primaria, ma la corrente secondaria riesce molto o poco sfasata a seconda della selfinduzione. Ora siccome la frequenza della corrente nel rotore, come abbiam visto, può variare, così anche la f. e. m. di selfinduzione (che è proporzionale alla frequenza) può variare molto e precisamente sarà più alta all'avviamento e quando lo slittamento è forte; e minore ed insignificante quando lo slittamento è piccolo e vicino a zero, cioè quando il motore funziona con piccolo carico.

Confronto cogli alternatori e coi motori sincroni. — Abbiam visto che nei motori asincroni polifasi si forma nello statore un campo magnetico ruotante come se tante calamite risvolte verso l'interno girassero colla velocità di sincronismo. Nel rotore le correnti indotte, se l'avvolgimento è fatto debitamente, si sviluppano altrettanti poli che sono come le immagini riflesse dei poli dello statore. Però (come negli alternatori o nei motori sincroni) la posizione reciproca delle due corone di poli affacciati può essere diversa.

La posizione reciproca dipende dal ritardo della corrente del rotore rispetto a quella nello statore; se la corrente nel rotore è, come nel periodo di avviamento, molto in ritardo,

allora i poli *n - s - n - s* tendono a portarsi sotto i poli omonimi N-S-N-S dello statore. In questa posizione (fig. 353) la forza fra le due corone dei poli sarà piccola perchè si respingono e si neutralizzano. Mano mano che la corrente nel rotore diminuisce di ritardo, i poli *n-s-n-s* tendono a staccarsi ed a mettersi in posizione simmetrica fra i poli N-S-N-S (fig. 354).



Figg. 353 - 354 - Posizioni limiti dei poli immaginari in un motore quando la corrente secondaria è spostata di 180° e 90° rispetto alla fase primaria.

In questa posizione la forza esercitata è massima e sarà quindi massima la coppia ove però i poli *n-s-n-s* avessero a mantenere la loro intensità. Accade invece che quando il rotore, aumentando la velocità si avvicina al sincronismo la corrente nel rotore stesso diminuisce e quindi anche l'intensità dei poli indotti diventa piccola. In questo modo si spiega come la coppia torcente attiva dei motori asincroni ha l'andamento rappresentato dalla curva della figura 355.

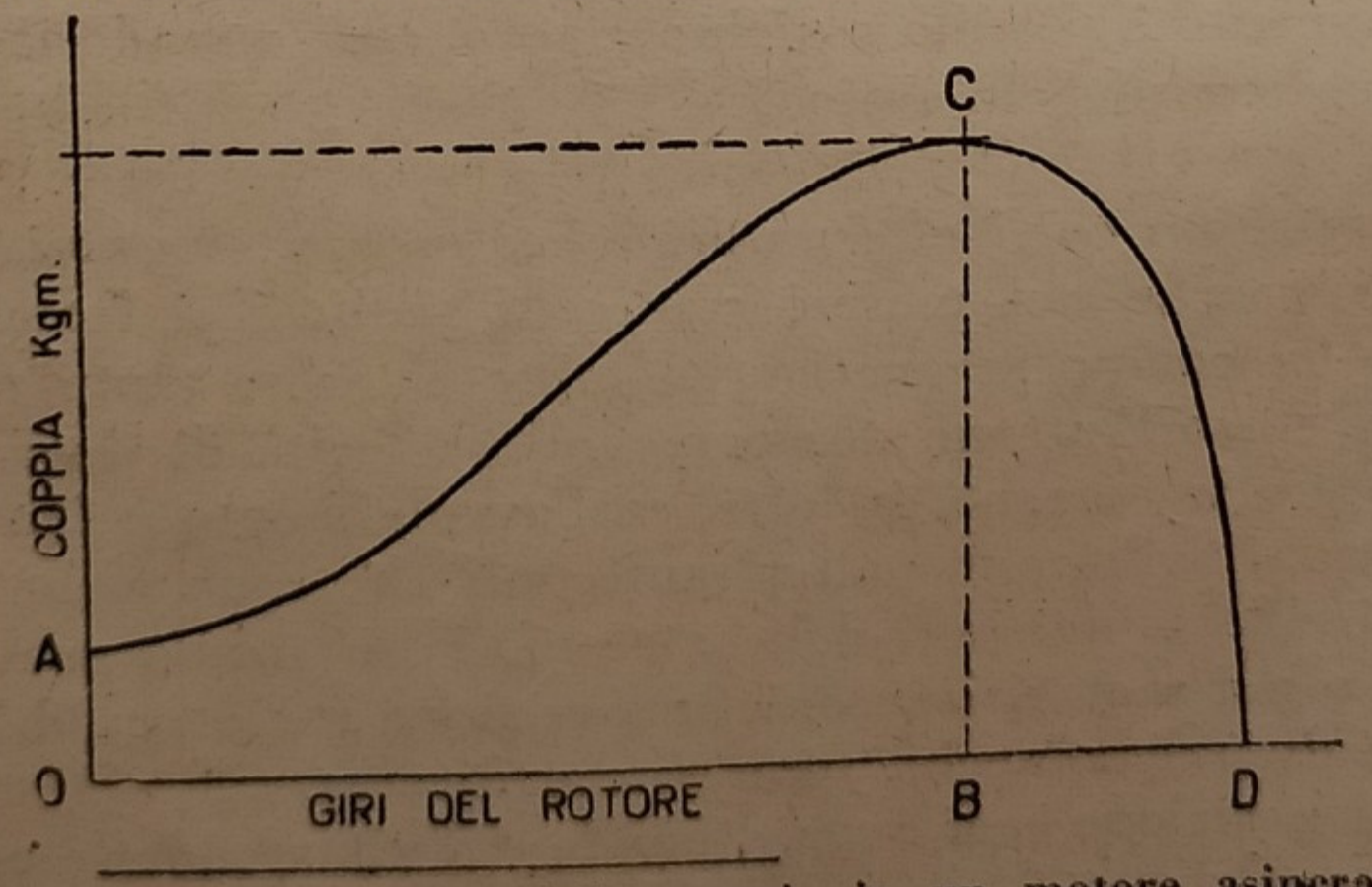


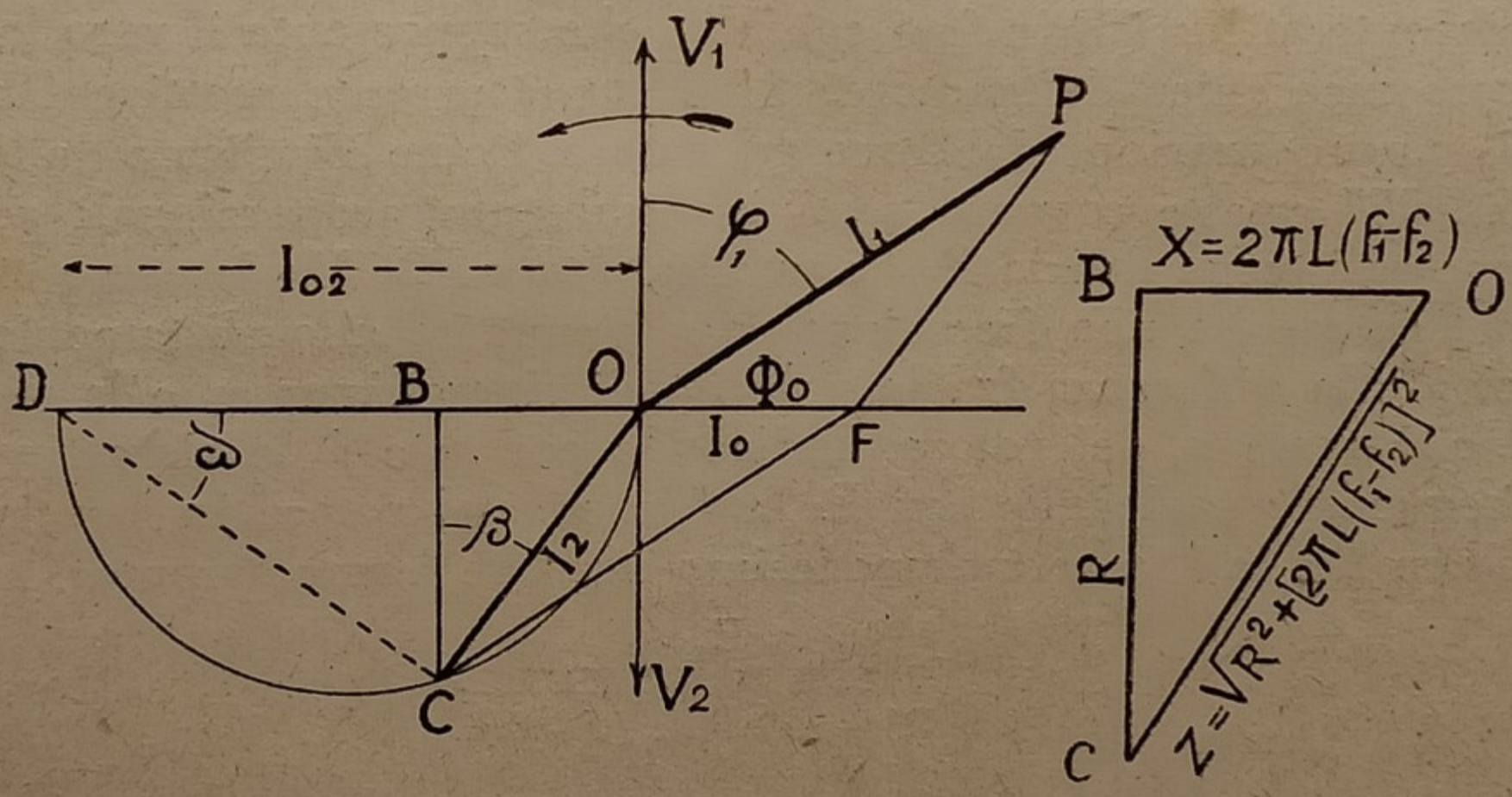
Fig. 355 - Diagramma della coppia in un motore asincrono.

In questa figura si vede che all'avviamento del motore la coppia torcente è piccola benchè la corrente in questo istante sia grande; ciò è dovuto al fatto che la corrente è sfasata molto rispetto al flusso induttore.

Si vede poi che la coppia aumenta fino ad un massimo (punto C) vicino al sincronismo. Da questo punto fino al punto D che corrisponde alla velocità di sincronismo la coppia si impiccolisce e si annulla rapidamente perchè la corrente nel rotore diminuisce in pari misura.

Le variazioni di intensità e di sfasamento della corrente nel rotore si ripetono ugualmente nello statore, e ciò perchè rotore e statore formano il secondario e il primario di un trasformatore.

184. Diagramma di Heyland. — Supponiamo di avere un motore asincrono coi circuiti interni di resistenza trascurabile e senza flussi di dispersione e sia OV_1 il vettore che rappresenta la f. e. m. nel primario (circuito dello statore). (Figura 356).



Figg. 356 . 357 - Diagrammi vettoriali per spiegare il funzionamento dei motori asincroni.

Come nei trasformatori la f. e. m. nel secondario (rotore) sarà rappresentata da un vettore OV_2 opposto a OV_1. Sia OP il vettore della corrente primaria I_1. Nel nucleo di ferro dello statore vi sarà un flusso reale Φ_0 che per principio generale

(parag. 123) è in ritardo di 90° rispetto a V_1. Indichiamolo col tratto OF. Il flusso Φ_0 è alla sua volta risultante dall'azione di due flussi: 1.° di un flusso Φ_1 in fase con I_1; 2.° di un flusso Φ_2 provocato dalla corrente I_2 nel rotore ed in fase con questo. Supponiamo di indicare con I_0 la corrente magnetizzante in fase con Φ_0. Allora se da F tiriamo una parallela a OP e da O una parallela a FP avremo completato il parallelogramma nel quale il vettore I_0 è risultante di I_1 e di I_2.

Da quanto si è detto nel precedente paragrafo la corrente I_2 è zero quando il rotore del motore ha la velocità di sincronismo corrispondente alla frequenza f_1 nello statore. Quando invece il *rotore fosse fermo* esso *diventa una pura self* e quindi il vettore della corrente, che chiameremo per questo caso Io_2, sarà perpendicolare alla OV poichè la corrente è sfasata in ritardo di 90° rispetto alla tensione. Sia OD questo vettore.

In tutti gli altri stadi intermedi di marcia del motore la I_2 sarà rappresentabile da un vettore OC in ritardo rispetto a OV_2 e si potrà scomporre in due componenti: 1.° di una corrente attiva CB in fase con V_2 e che rappresenta il vero lavoro meccanico del motore; 2.° di una corrente reattiva OB di magnetizzazione del ferro del rotore. Come è indicato dalla fig. 357 queste correnti sono inversamente proporzionali ad una resistenza fittizia R e a una induttanza X. Ma la corrente nel rotore ha una frequenza corrispondente allo slittamento cioè alla differenza fra la velocità di sincronismo v_1 e la velocità reale v_2 del rotore. Indicando con f_1 e f_2 le rispettive frequenze; indicando con E_2 la f. e. m. nel rotore in marcia e con Eo_2 la f. e. m. nel medesimo a rotore fermo avremo:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R^2 + (2\,\pi\,L\,(f_1 - f_2))^2}} \qquad (1)$$

$$I_{02} = \frac{E_{02}}{2\,\pi\,L\,f_1} \qquad (2)$$

Inoltre vi ha che $E_2 : Eo_2 = f_1 - f_2 : f_1$. Cavando da questa proporzione il valore di E_2 e sostituendolo nella formola (1) si ha:

$$I_2 = E_{02}\,\frac{f_1 - f_2}{f_1}\,\frac{1}{\sqrt{R^2 + (2\,\pi\,L\,(f_1 - f_2))^2}}$$

Moltiplicando per 2 π L numeratore e divisore si ha:

$$I_2 = E_{02} \frac{1}{2 \pi L f_1} \frac{2 \pi L f_1}{\sqrt{R^2 + (2 \pi L (f_1 - f_2))^2}}$$

Sostituendo in questa formola il primo termine coll'eguale valore della formola (2) e osservando in base alla fig. 356 che il 2.° termine rappresenta sen β si ha:

$$I_2 = I_{02} \text{ sen } \beta$$

cioè la corrente del rotore in marcia è uguale a quella del motore con rotore fermo moltiplicato per sen β.

Dal triangolo ODC risulta che affinchè I_2 sia uguale a I_{02} sen β occorre che esso sia rettangolo in C, ossia il punto

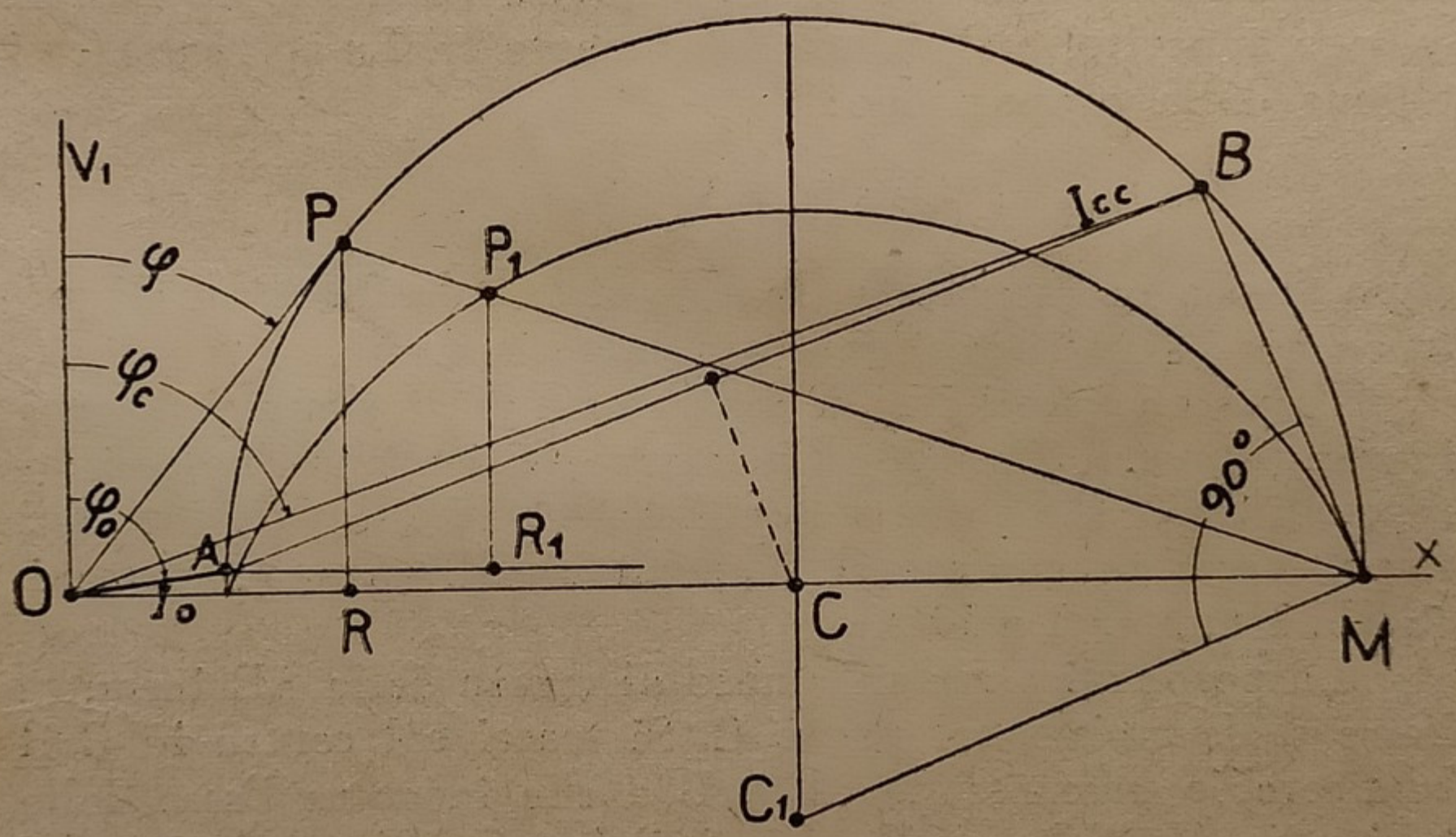


Fig. 358 - Diagramma di Heyland.

C percorre un cerchio che ha per diametro OD. Ma allora essendo I_0 una lunghezza costante, se il punto C percorre un circolo anche il punto P deve percorrere un circolo; da ciò l'origine del diagramma di Heyland il quale per primo stabilì il principio che il vettore della intensità della corrente I_1 di un motore asincrono varia in modo che il suo estremo P percorre un circolo.

Per disegnare il diagramma di Heyland di un motore

trifase qualsiasi si comincia a misurare la tensione V_1 la corrente I_{01} del motore a vuoto e la energia consumata Wo. Da queste misure con facili formole si cava il fattore di potenza cos φ

$$\text{Cos } \varphi_0 = \frac{W_0}{1{,}73 \times V_1 \times I_{01}}$$

Quindi si mette il rotore, tenuto fermo, in corto circuito agli anelli e si misura con wattmetro, amperometro e voltmetro la potenza Wc, la corrente Ic e la tensione all'istante dello smarramento.

Però di solito non è possibile applicare la piena tensione V_1 al motore in corto circuito perchè provocherebbe un richiamo troppo forte e pericoloso di corrente; perciò si applica a motore fermo una tensione Vr ridotta (a mezzo di trasformatore apposito) e si misura la corrente Ir. La corrente Ic si ottiene dalla proporzione:

$$I_c : I_r = V_1 : V_r$$

dopo di che in base a Wc, Ic e V_1 si calcola il fattore di potenza cos φ_c di corto circuito a motore fermo.

Preparati questi dati, il diagramma di Heyland si disegna in questo modo (fig. 358). Dal centro O si tirano due assi ortogonali OV_1 e OX e due vettori OA = I_0 ed OB = Ic inclinati rispettivamente coll'asse OV_1 degli angoli φ_0 e φ_c trovati. (Scala 1 mm = 1 a 10 A).

La perpendicolare sul punto di mezzo della AB incontra l'asse delle ascisse nel punto C. Si tracci col centro in C il semicerchio passante per A e B e che incontra l'asse delle ascisse in M. Tale semicerchio è il luogo delle estremità dei vettori delle intensità I_1 assorbite dallo statore del motore.

Di solito la potenza di regime assegnata ai motori corrisponde a quella del vettore OP tangente al semicerchio avente cos φ massimo. Le perpendicolari PR e OR della intensità I normale rappresentano le componenti attive e reattive della I.

La PR in opportuna scala rappresenta la potenza assorbita Wa ossia:

$$W_a = V_1 \, I_1 \cos \varphi \sqrt{3}$$

La scala delle potenze sarà Wa : PR essendo PR espresso in millimetri.

Per avere la potenza resa o meccanica del motore si conduca la BM e da M una perpendicolare alla stessa fino ad incontrare in C_1 la verticale passante per C. Centro in C_1 si tracci il semicerchio passante per M e F e quindi la parallela AR_1 all'asse delle ascisse. Il 2° semicerchio incontra la PM in P_1 e la $P_1 R_1$ rappresenta la potenza resa W_2 (nella stessa scala di PR).

Il rendimento è:

$$y = \frac{P_1 R_1}{P R}$$

Con altri artifici, che si possono trovare sui testi classici di elettrotecnica si possono tracciare: la coppia, le perdite, lo slittamento ecc.

Il diagramma di Heyland si applica sempre per il collaudo dei motori.

185. Avviamento dei motori asincroni. — Quando un motore di questo tipo ha l'avvolgimento in corto circuito e viene allacciato ai fili di alimentazione colla tensione normale, si forma, come nei trasformatori col secondario in corto circuito, una intensa corrente limitata solo dalla induttanza dei circuiti. I piccoli motori fino a 5 a 6 HP avendo una massa piccola da smuovere, riescono ad avviarsi rapidamente e far abbassare la corrente sviluppando una forza contro elettromotrice. Ma pei motori grossi la corrente troppo intensa, mantenendosi per un tempo apprezzabile, può provocare un surriscaldamento e la bruciatura degli isolanti dei fili.

Inserendo una resistenza nel circuito del rotore a mezzo degli anelli, si viene a limitare la corrente di avviamento; inoltre la corrente si sfasa di meno e la coppia aumenta.

I reostati di avviamento, di cui si devono munire tutti i motori oltre 5-6 HP, vengono inseriti sul circuito del rotore per avere maggior coppia all'avviamento; se le resistenze fossero messe sul circuito dello statore la coppia di avviamento sarebbe molto minore.

Ecco il perchè si costruiscono i motori ad avvolgimento aperto muniti di anelli.

I reostati di avviamento devono potersi regolare in modo che, mano mano che i motori prendono velocità, si possa diminuire la resistenza fino a ridurla in corto circuito.

I reostati sono perciò muniti generalmente di tastiera e di contatto mobile, a mezzo di un manubrio.

I reostati dei motori trifasi sono formati da tre resistenze *a secco, in olio ed a liquido.* L'inserzione si fa come risulta dallo schema della fig. 359.

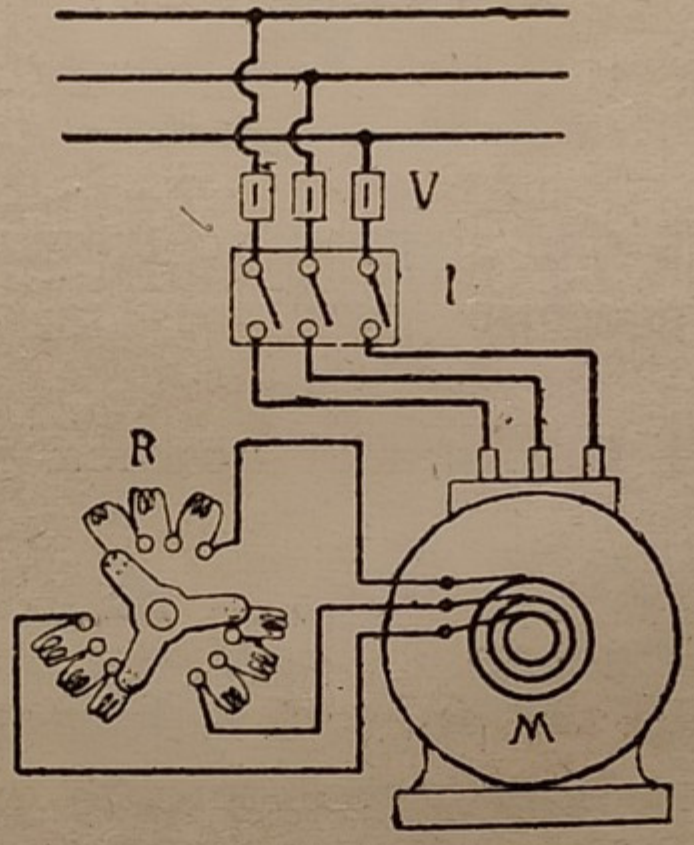


Fig. 359 - Inserzione del reostato di avviamento in un motore trifase.

Come fili metallici per costruire i reostati si adoperano quelli di ferro o di argentana; la loro sezione deve essere proporzionata alla intensità massima tollerabile nel rotore. Nei reostati immersi, l'olio ha facoltà di assorbire più rapidamente il calore che si svolge nelle spirali di resistenza. I reostati a liquido sono formati da lamiere di ferro che si immergono in un vaso di ghisa contenente una soluzione di bicarbonato di soda od altro sale non corrosivo del ferro. (Fig. 360).

Avviamento stella-triangolo. Alcuni costruttori usano di avviare i motori mettendo con un commutatore i circuiti statorici a stella nel periodo d'avviamento e a triangolo nella marcia ordinaria. Il rotore si lascia in corto circuito.

L'avviamento in corto circuito siccome crea dei subitanei

e grandi assorbimenti di corrente, provoca degli abbassamenti di tensione nella rete; perciò l'uso dei motori in corto circuito viene concesso dai distributori di energia solo per piccole potenze. Per motori di media potenza di questo tipo si prescrive di fare l'avviamento senza carico sul motore.

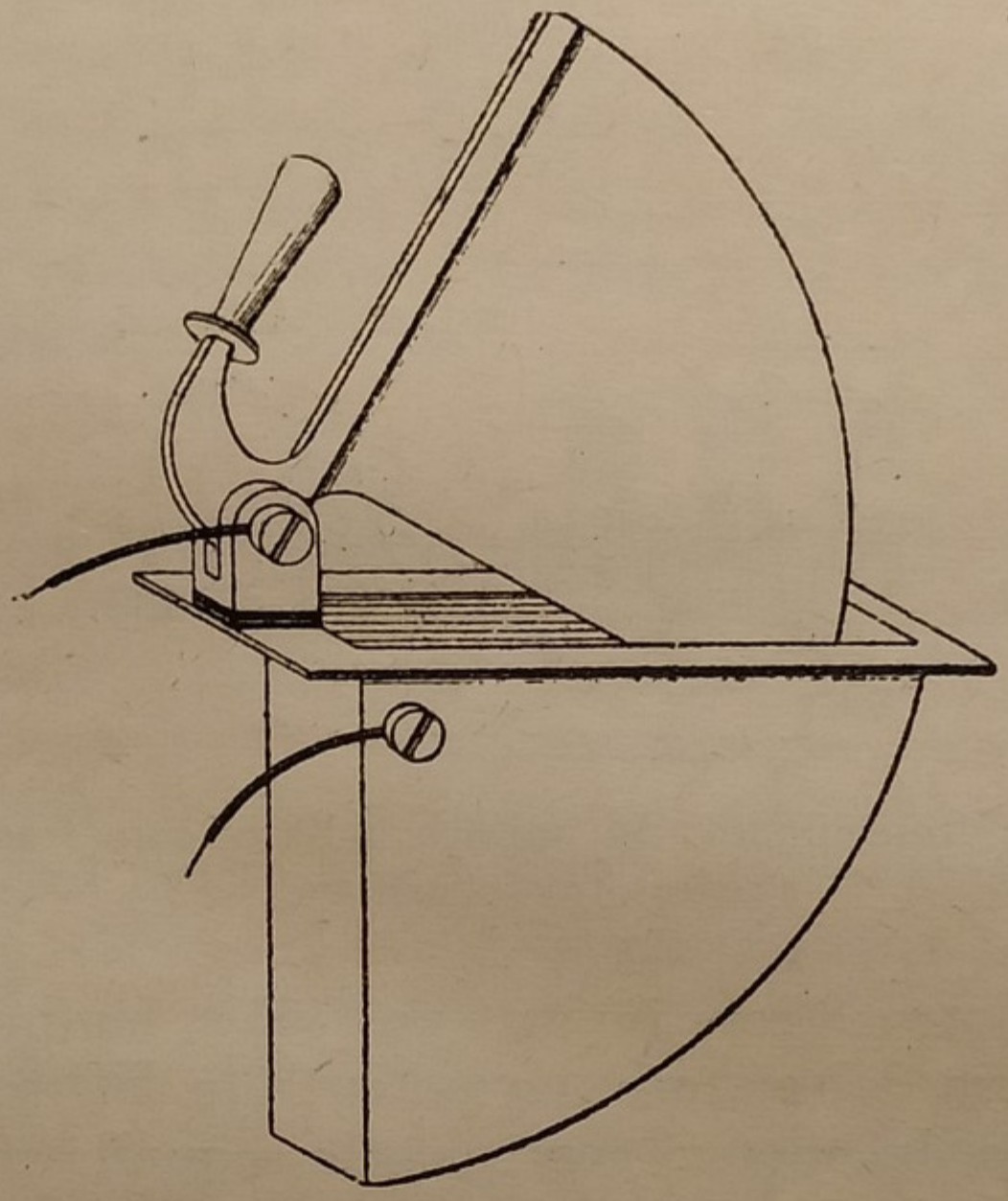


Fig. 360 - Reostato a liquido unipolare.

Pei motori con rotore in corto circuito collocati in luoghi poco accessibili (in fondo a pozzi o sui soffitti), si provoca l'avviamento alimentandoli con tensioni crescenti da un terzo al massimo mediante appositi trasformatori aventi le spire suddivise ed inseribili mediante un corsoio su tastiera. Fig. 361).

186. Potenza dei motori. — La potenza assorbita dai motori asincroni è espressa dalle solite formole in watt.

$$W = E\ I \cos \varphi \qquad \text{pei motori monofasi}$$
$$W = 1{,}41\ E\ I \cos \varphi \qquad \text{pei motori bifasi}$$
$$W = 1{,}73\ E\ I \cos \varphi \qquad \text{pei motori trifasi}$$

La potenza resa si ha moltiplicando la potenza assorbita per il rendimento garantito o presunto del motore. Il rendimento varia dai piccoli ai grandi motori da 0,7 a 0,9. Dividen-

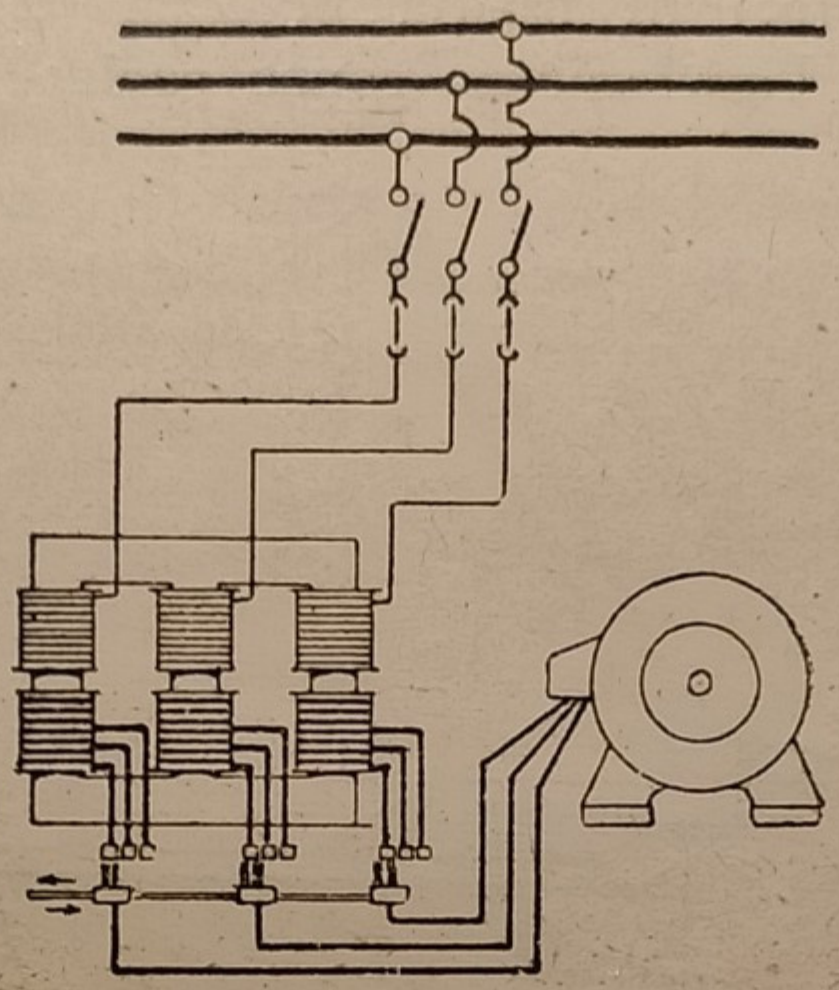


Fig. 361 - Avviamento di motore trifase con trasformatore o autotrasformatore.

do infine la potenza resa in watt per 763 si hanno i cavalli-vapore sull'albero del motore. La potenza in HP o KW segnata sulla targhetta dei motori corrisponde a quella resa ossia alla potenza meccanica.

187. Regolazione della velocità e inversione di moto. La velocità dei motori asincroni è quasi costante se la frequenza è mantenuta costante; difficilmente questa velocità può essere diminuita. Una diminuzione nel numero dei giri di un motore si può ottenere inserendo delle resistenze nel rotore mediante lo stesso reostato di avviamento. Ma con tale sistema la potenza dei motori (coppia) si riduce e inoltre si ha un grande sciupìo di energia nel reostato; perciò il sistema si può tollerare appena per diminuzioni di velocità dell' 8-10 per cento.

La regolazione economica della velocità dei motori asincroni, specialmente di quelli molto potenti usati nelle ferrie e è stata oggetto di parecchi brevetti; lo scopo di essi è quello di eliminare l'uso delle resistenze da inserirsi nel rotore e di sostituirle con apparecchi utilizzatori della energia sviluppata

del rotore stesso. Perciò alle resistenze si sostituiscono motori secondari, convertitori, ecc., in modo da ricuperare l'energia che si rende disponibile nel rotore quando vien ridotta la velocità, trasformandola in corrente continua o in corrente alternata atta a rimandarsi sulla linea.

La inversione di marcia dei motori trifasi si ottiene scambiando due fasi qualsiasi agli attacchi dei motori. Quando un motore deve fare molte inversioni di marcia (motori di trazione, motori per gru e verricelli) l'inversione si opera a mezzo di controller i quali oltre al commutare la corrente di due fasi operano ad ogni inversione la inserzione e disinserzione delle resistenze di avviamento.

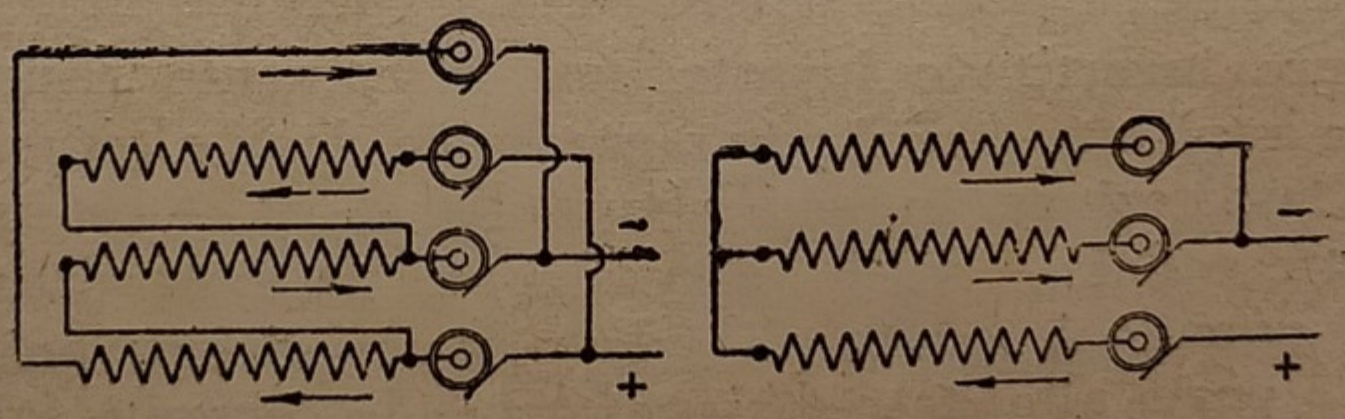
188. Generatori asincroni. - Motori asincroni sincronizzati. — Si dicono *generatori asincroni* i motori asincroni ordinari quando si fa invertire la loro funzione. Se noi immaginiamo di spingere il rotore di un motore con una forza sussidiaria alla velocità di sincronismo, verrebbe a cessare ogni effetto induttivo nel rotore e quindi ogni corrente sia nel rotore che nello statore; ma se si spinge più oltre la velocità, nel circuito del rotore si formerà una corrente in senso contrario di quella di prima. Infatti quando il rotore ruota sincronicamente al campo statorico non avviene nessun taglio di linee di forza; ma se il rotore ritarda od accelera si sviluppano nell'avvolgimento delle f. e. m. indotte che saranno nel primo caso contrarie a quelle dell'altro. La corrente nello statore resta pure invertita e invertendosi la corrente rispetto alla tensione applicata essa si comporta come degli alternatori cioè prende la direzione, in ogni istante, dal + al — esternamente al motore e dal — al + internamente. Il motore asincrono quindi, quando è spinto oltre la velocità di sincronismo del 5 all'8% passa allo stato di generatore; la corrente sviluppata sarà tanto maggiore quanto più grande è lo *slittamento in avanzo;* l'eccitazione della macchina (corrente di magnetizzazione) viene presa sempre dalla rete di distribuzione ed è rappresentata dalla componente a 90° della corrente attiva in fase colla tensione o praticamente dalla corrente a vuoto del motore.

I motori sincroni possono funzionare solo da generatori

quando possono prendere la componente di magnetizzazione da altri generatori connessi alla rete di distribuzione: un generatore asincrono alimentante da solo un circuito formato da una resistenza ohmica od induttiva non potrebbe funzionare; esso funziona solo quando è connesso con una rete alimentata da alternatori che per distinzione sono chiamati *generatori sincroni* oppure da condensatori.

E' possibile anche di far passare un generatore asincrono (motore asincrono ad anelli) allo stato di generatore o di motore sincrono qualora si disponga di conveniente corrente continua. Sappiamo che un motore asincrono marciante ad una velocità prossima a quella di sincronismo e cioè con un piccolissimo slittamento, nell'avvolgimento rotorico si svolge una corrente alternata di bassissima frequenza, nell'ordine di una frazione di periodo a un periodo al minuto secondo. Ora se noi in un dato istante mediante un commutatore sostituiamo alla lentissima ondulazione della corrente alternata una corrente continua, ecco che il rotore resterà calamitato con tanti poli permanenti come se al medesimo si fosse sostituito la ruota polare di un alternatore.

Se il rotore è trifase a stella per ottenere i poli permanenti bisogna inviare la corrente in uno degli anelli e farla ritornare cogli altri due; ma con questo metodo si crea una corrente doppia in una fase di quella nelle altre due. Se l'avvolgimento è a triangolo la corrente continua deve essere invertita in una delle fasi. (Fig. 362-363).



Figg. 362 - 363 . Immissione di corrente continua nei rotori dei motori asincroni per renderli sincroni.

Quanto abbiam detto sulla riduzione dei motori asincroni in sincroni mediante iniezione di corrente continua si può fare in via sperimentale; ma per vere applicazioni pratiche bisogna anche variare alquanto la costruzione del motore sin-

crono. I motori sincroni resi sincroni colla corrente continua si dicono *asincroni sincronizzati* e presentano il vantaggio di poter assorbire corrente alternata con fattore di potenza uguale all'unità cioè senza sfasamento. La corrente continua viene presa da una eccitatrice accoppiata.

I motori asincroni sincronizzati vanno ora diffondendosi negli stabilimenti per potenze da 15 a 20 HP in su non solo perchè il fattore di potenza è uguale a uno, ma anche perchè hanno una velocità assolutamente costante comunque varii il carico, sopportano grandi sovraccarichi e migliorano il cos φ complessivo dello stabilimento. L'avviamento avviene in asincrono coi soliti reostati; quando si giudica che la velocità è prossima alla massima con un ultimo movimento del reostato si inserisce la dinamo eccitatrice e il motore diventa un sincrono. Il motore asincrono sincronizzato ha una coppia di avviamento molto maggiore degli autosincroni (motori sincroni che si avviano da soli).

189. Motori monofasi asincroni ed a collettore. — Abbiamo fin qui supposto che nei motori asincroni vi sia un campo magnetico ruotante; ma ciò è possibile solo quando l'avvolgimento dello statore è avvolto per corrente trifase o bifase. Se l'avvolgimento è monofase invece di un campo ruotante si forma un *campo pulsante* e quindi non si dovrebbe verificare più il fenomeno del trascinamento e della coppia.

Effettivamente si nota che se ad un motore trifase si leva la comunicazione di una fase il motore, pur assorbendo maggior corrente, seguita a ruotare. Si nota però che la sua potenza diminuisce sensibilmente e che a vuoto non si avvia da sè. Dunque si vede che quando un motore monofase è in rotazione si forma un campo ruotante che mantiene il movimento e la coppia. Tale campo è risultante dall'azione del campo pulsante dello statore e del campo del rotore.

Per ottenere l'avviamento dei motori monofasi lo statore viene provvisto di due circuiti avvolti in bifase di cui uno forma l'avvolgimento principale, l'altro un circuito sussidiario in parallelo col primo e che si adopera soltanto all'avviamento. I due circuiti si mettono in parallelo sul circuito esterno monofase. Durante l'avviamento si inserisce nel circuito sussidiario un condensatore oppure una forte impendenza in modo

da creare una corrente sfasata in anticipo od in ritardo di fase rispetto alla corrente nel circuito principale. In questo modo si ottiene un campo ruotante ed una coppia sensibile all'avviamento. Dopo che il motore ha preso velocità con un commutatore si disinnesta il circuito ausiliario.

Ma i motori monofasi migliori sono quelli a collettore, costruiti ed avvolti come i motori in serie a corrente continua e colla sola variante di avere i poli induttori lamellari invece che massicci. Noi abbiam visto, parlando dei motori a corrente continua, che se si inverte la corrente ai morsetti, il senso di rotazione rimane invariato; dunque se si alimentasse un motore a corrente continua con una corrente alternata il motore dovrebbe girare e comportarsi ugualmente. Si oppongono a questa deduzione diverse difficoltà fra le quali: 1.° la grande autoinduzione del circuito induttore; 2.° la formazione di forti correnti di Foucault nei nuclei massicci degli induttori. Si hanno inoltre forti scintille al collettore. Queste difficoltà vengono superate: 1.° Avvolgendo i poli lamellari col minor numero di spire; 2.° facendo i nuclei magnetici a struttura lamellare; 3.° introducendo delle piccole resistenze (tratti di filo alta resistività) tra i fili d'avvolgimento e gli attacchi al collettore; 4.° adattando al sistema induttore dei poli ausiliari. Nei moderni motori monofasi in serie a collettore il sistema induttore non si fa più a poli salienti come nelle dinamo, ma ad anello con avvolgimenti affatto simili a quelli degli alternatori monofasi o dei motori monofasi asincroni. I poli ausiliari sono ottenuti mediante un avvolgimento in serie sussidiario spostato di 90° elettrici rispetto all'avvolgimento principale.

190. Motori asincroni compensati. — Fra i diversi tipi il più comune e migliore adottato in Italia è il Sartori (costruzione Pelizzari, Clerici, ecc.) Le caratteristiche costruttive sono due:

1.° Lo statore e rotore sono costruiti e avvolti come i soliti motori asincroni; ma però le parti sono invertite e cioè la corrente di linea è comunicata con tre anelli al rotore, mentre lo statore fa da indotto con un avvolgimento trifase o bifase connesso al solito reostato di corto circuito.

2.° Il rotore porta oltre al solito avvolgimento principale

in trifase un secondo ausiliario, nelle stesse scanalature, connesso come quello di una dinamo ad un collettore a lamelle. L'induzione del campo ruotante produce al collettore una corrente continua colla quale si può alimentare l'avvolgimento statorico in determinati punti in modo da creare polarità fisse. Il motore diventa così un motore sincrono a induttore fisso e indotto mobile.

Nel periodo di avviamento si regola la corrente indotta nello statore con un reostato comune; raggiunta una buona velocità e cioè quando il circuito ausiliario è eccitato si mette in comunicazione le spazzole col circuito statorico.

I motori di questo tipo hanno un ottimo rendimento anche a carico parziale, una coppia d'avviamento pari a quella dei motori asincroni ordinari; il fattore di potenza uguale all'unità; sopportano come gli asincroni forti sovraccarichi istantanei senza perdere di coppia.

191. Prove del rendimento dei motori sia a c. c. che a c. a. — Le perdite di energia nei motori sono costituite come nelle dinamo: 1.° dalle *perdite meccaniche* di attrito e ventilazione; 2.° dalle *perdite magnetiche* per isteresi e correnti di Foucault; 3.° dalle *perdite elettriche* nei conduttori dello statore e del rotore.

La determinazione del rendimento dei motori tanto a corrente continua che a corrente alternata si può fare in due modi: *a*) metodo diretto; *b*) metodo indiretto. Il metodo diretto consiste nel determinare l'energia meccanica resa mediante un *freno dinamometrico* e l'energia elettrica mediante dei wattmetri inseriti sul circuito di alimentazione. Se si tratta di motore a corrente continua basta un voltmetro e un amperometro.

Il metodo indiretto consiste nel determinare separatamente le perdite. Come si è già detto se r è il rendimento di un motore, Wm la potenza meccanica resa, We la potenza elettrica assorbita, P le perdite, si ha:

$$r = \frac{\mathrm{W}m}{\mathrm{W}e} = \frac{\mathrm{W}m}{\mathrm{W}m + \mathrm{P}}$$

esprimendo le potenze e le perdite nella stessa unità di misura e cioè in watt.

Freni dinamometrici. I freni dinamometrici più impiegati sono: *i freni a ceppo o di Prony; i freni a nastro; i freni elettromagnetici.*

I freni dinamometrici a ceppi sono appoggiati sul seguente dispositivo: sopra l'asse del motore si adatta una puleggia a ribordi munita di due ceppi di legno o di ghisa che si possono serrare sulla puleggia mediante viti. (Fig. 364).

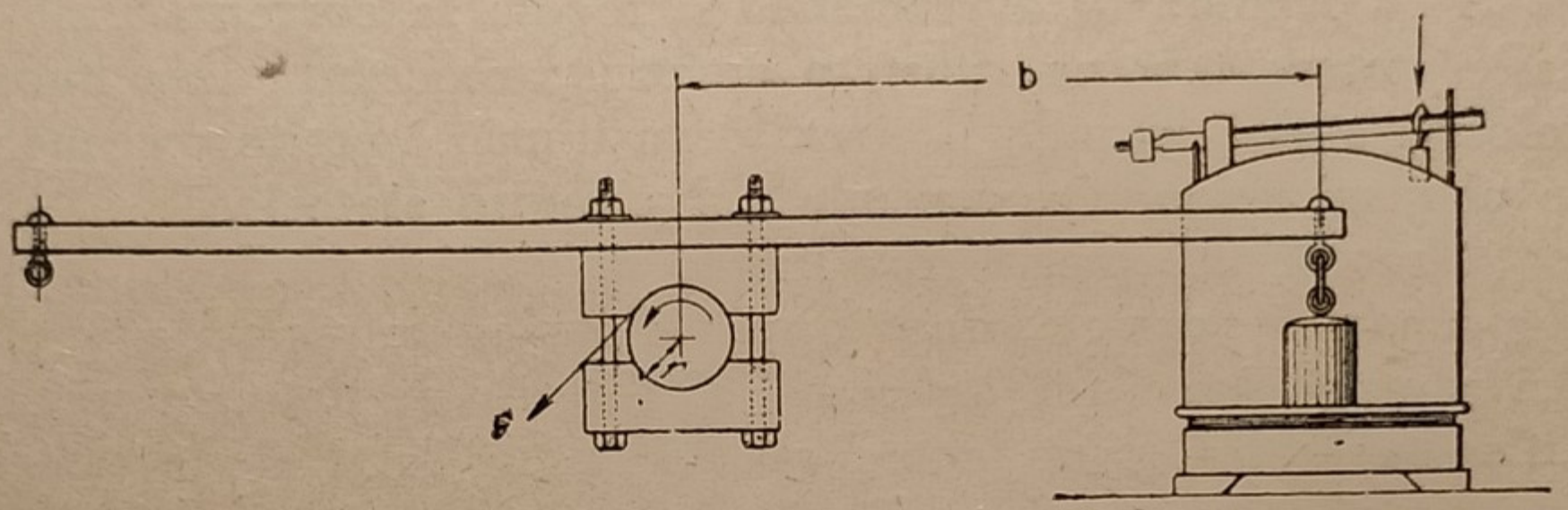


Fig. 364. - Freno dinamometrico di Prony.

Al ceppo superiore è applicato un braccio di leva (generalmente equilibrato) all'estremità del quale si attacca solidamente un peso appoggiato sopra il piano di una bilancia a bascule. Serrando i ceppi, quando il motore funziona, il freno assorbe una certa potenza, trasformando l'energia in calore. Se il motore gira nel senso indicato dalla figura, il braccio di leva solleverà la bilancia di un certo peso P in Kg. Sia *b* la lunghezza del braccio in metri; *r* il raggio della puleggia; *n* il numero dei giri al 1'; F la forza tangenziale d'attrito agente alla periferia della puleggia. La potenza assorbita dal freno e fornita dal motore sarà espressa dal prodotto della forza F d'attrito per lo spazio al minuto secondo ossia da:

$$F \times \frac{2 \times \pi \times r \times n}{60}$$

Ma il prodotto di F per *r* esprime la coppia o momento resistente; questa coppia è uguale alla coppia nello stesso piano espressa da $P \times b$. Quindi la potenza del motore sarà:

$$\text{in chilogrammetri al 1"} = \frac{P \times b \times 2\pi \times n}{60}$$

$$\text{in cavalli-vapore} = \frac{P \times b \times 2\pi \times n}{60 \times 75} = 0{,}00139\ P \times b \times n$$

$$\text{in watt} = \frac{P \times b \times 2\pi \times n}{60 \times 75}\ 736 = 1{,}027\ P \times b \times n$$

Ciò premesso per eseguire l'esperienza, dopo di aver ben centrata la puleggia, si muove il motore tenendo i ceppi allentati e col romano della bilancia si fa un primo rilievo; poi si mette il romano successivamente a 10-15-20 Kg. ed ogni volta si stringono le viti dei ceppi a poco a poco tanto da sollevare e mantenere in bilico la bilancia.

Ad ogni esperienza si misura il numero dei giri con un contagiri ed un contasecondi oppure con un tachimetro; contemporaneamente si leggono i wattmetri inseriti nel circuito del motore e possibilmente anche i volt e gli ampères medi. Per fare tutte queste letture contemporaneamente bisognerà disporre di diversi operatori dei quali uno alla bilancia, uno alla misura della velocità ed uno a leggere gli strumenti elettrici.

Le letture si radunano in una tabella come segue:

N. Esperienze	Potenza resa			Potenza assorbita					Rendimento
	P	n	1.027 P x b x n	W_1	W_2	W_1+W_2	V	A	

dove con W_1 e W_2 si indicano le letture dei wattmetri dato che il motore sia trifase.

Durante l'operazione di frenatura bisogna raffreddare continuamente le ganasce o ceppi con acqua saponata. Un sistema ottimo di raffreddamento consiste nell'impiego di una puleggia cava, invece che della solita forma, come è indicato dalla figura 365.

Davanti alla puleggia si mette una specie di scatola che raccoglie l'acqua lanciata fuori da un tubetto presso il bordo della puleggia; l'acqua si dispone per forza centrifuga tutto intorno alla superficie della puleggia raffreddandola energicamente e sorte dal tubetto.

Coln questo sistema si evita lo spruzzo d'acqua intorno alla puleggia. Per impedire alle ganasce di ingranarsi durante le esperienze si lubrificano con grasso, olio.

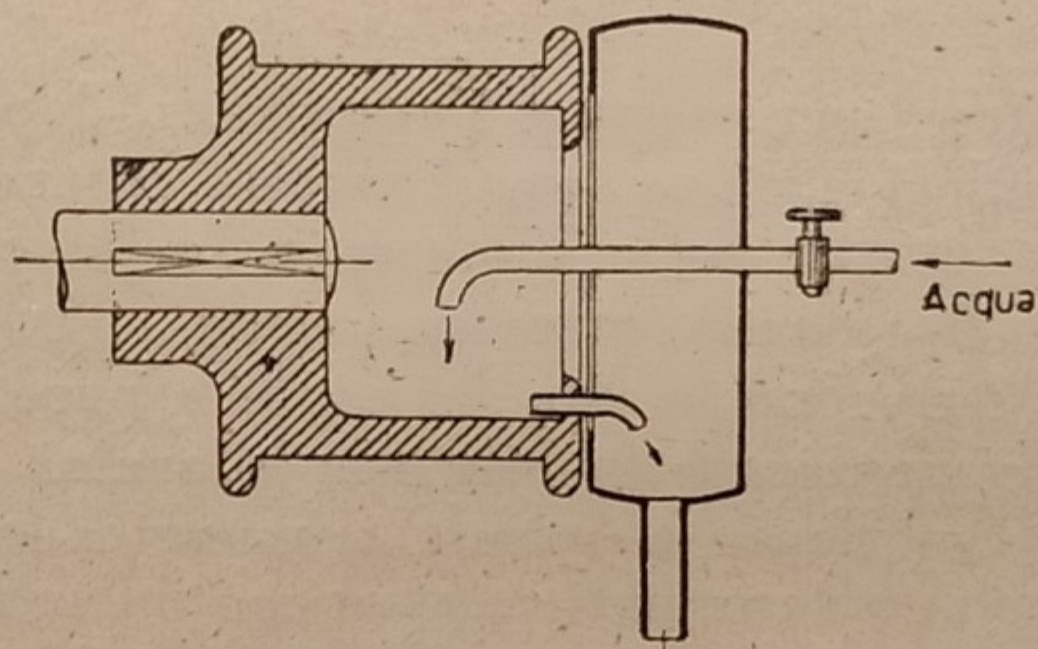


Fig. 365. - Puleggia cava per freno dinamometrico con circolazione d'acqua.

Quando il freno è un po' pesante esso va a caricare l'asse del motore con un maggior lavoro sui cuscinetti; tale lavoro sfugge all'esperienza del freno e quindi si commette un errore in meno della potenza del motore. Per verificare l'errore si può misurare la potenza elettrica assorbita dal motore a vuoto prima senza caricare l'albero del peso del freno, poi quando è caricato del medesimo. La differenza la si aggiunge alla potenza assorbita dal freno.

Si può anche calcolare l'errore colla formola:

$$\text{watt} = 1{,}027 \times 0{,}66 \times \text{peso del freno} \times n \times r_1$$

dove n è il numero dei giri e r_1 il raggio dei perni dell'albero del motore.

Il sistema di eseguire le frenature dei motori facendo lavorare il braccio in modo da premere sulla bilancia invece che sollevare il peso non è scevro di errori se il perno d'appoggio non è fatto in modo speciale ed accurato. Le oscillazioni del freno dovute ad inesatta centratura della puleggia creano un attrito sul perno ed un lavoro che sfugge ai rilievi.

Per la misura della potenza maccanica assorbita da piccoli motori si possono impiegare dei freni a nastro od a fune adattati in uno dei modi indicati dalla fig. 366.

In questi freni si misura la differenza di trazione Q —

P fra i due tratti di cinghia o nastro che avvolgono la puleggia; gli sforzi di trazione si misurano con dei dinamometri.

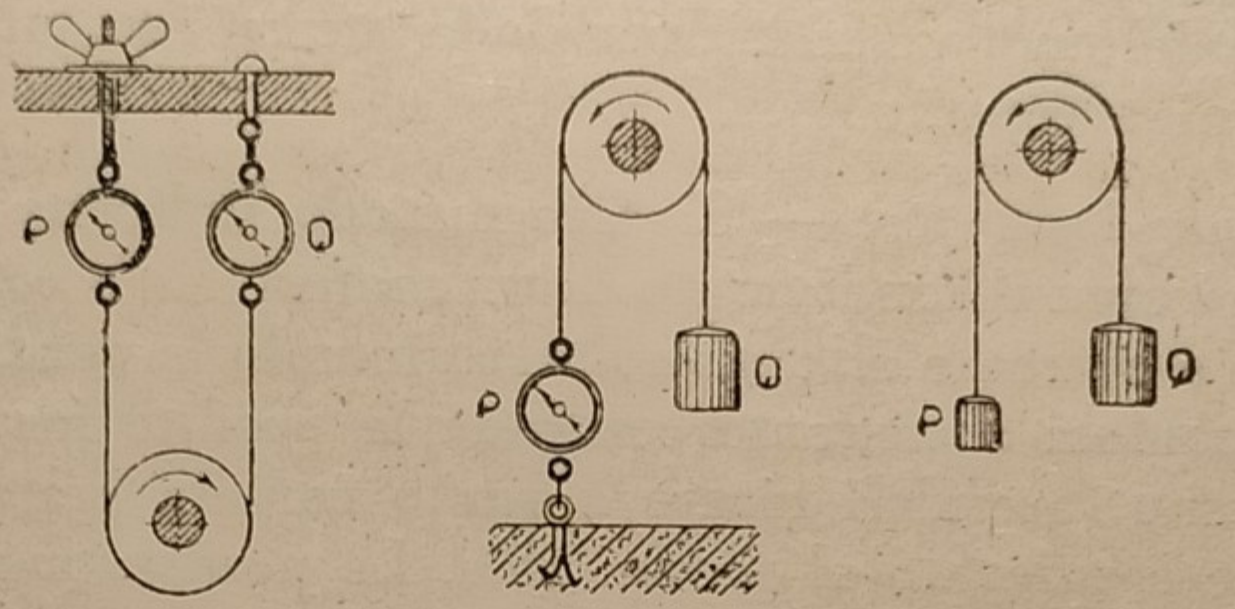


Fig. 366. - Freni a nastro.

Migliori di tutti sono i freni elettromagnetici noti da noi sotto il nome di *freni Pasqualini*. (Fig. 367).

Sull'asse del motore si monta un disco di rame D che si fa girare davanti ai poli di due elettrocalamite AA fissate sopra un telaio TT orizzontale. Il telaio è sostenuto nel punto

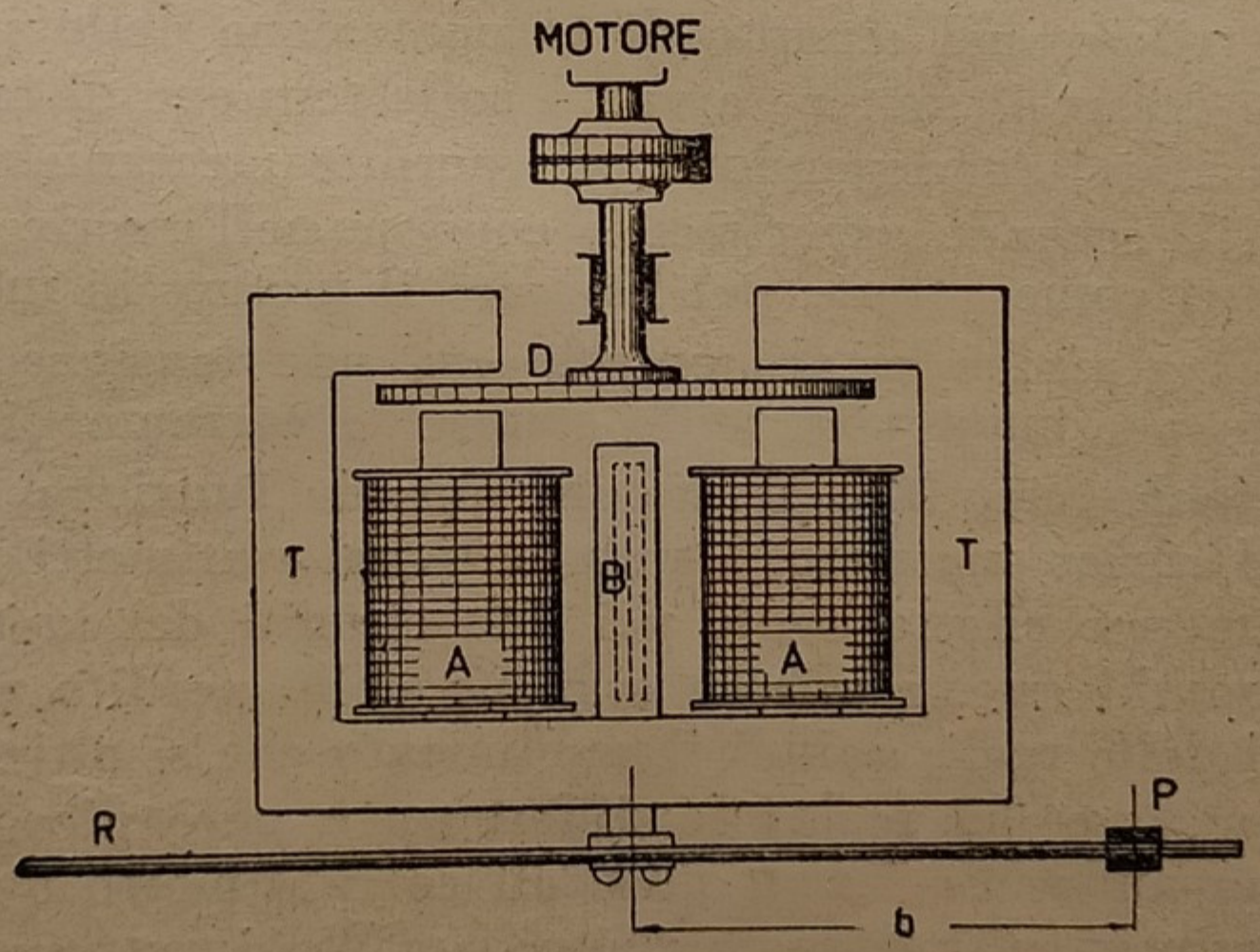


Fig. 367. - Freno elettro-dinamometrico Pasqualini visto in pianta

B da un coltello e può oscillare di un piccolo angolo. Girando il disco, si sviluppano in essa delle correnti di Foucault dovute alla presenza dei flussi magnetici dei due poli. Il telaio TT si inclina sollecitato da una coppia resistente uguale alla

coppia motrice. Mediante un peso P portato da un braccio di leva R. applicato al telaio si ristabilisce l'equilibrio del telaio. La forza del motore si ricava dalla stessa formola già data per i freni a ceppi.

Metodo indiretto. — Si dice metodo indiretto quello col quale si ricerca il rendimento di un motore sia a corrente continua che a corrente alternata determinando le perdite interne.

Nei motori a corrente continua le perdite meccaniche si determinano facendoli girare a vuoto con un motore ausiliario (come è spiegato al parag. 153). Le perdite meccaniche e magnetiche si determinano insieme misurando la energia consumata quando si fa funzionare il motore a vuoto ma eccitato ed alla sua velocità normale. Le perdite elettriche si ottengono colla calcolazione dei prodotti RI^2, sia per il circuito induttore che per l'armatura.

Il rendimento indiretto dei motori asincroni lo si determina praticamente con due esperimenti. Il primo consiste nell'inserire un wattmetro (o due nel caso che si tratti di corrente trifase) nel circuito di alimentazione dello statore e lasciando girare il motore a vuoto colla tensione di regime. I watt consumati corrispondono alle perdite meccaniche e magnetiche. Il secondo esperimento consiste nell'inserire ancora i wattmetri come prima; nel bloccare il motore in modo che non possa girare e di alimentarlo con una tensione appena sufficiente per mantenere nello statore la corrente di regime che dovrebbe assorbire il motore quando funziona normalmnte col carico massimo. I watt letti nei wattmetri segnano le perdite per effetto Joule nei due circuiti del motore.

Entrambi queste misure segnano delle perdite alquanto maggiori delle reali, quindi il rendimento che si ottiene è alquanto minore del reale; la differenza è però piccolissima.

Chiamando W_v i watt misurati col wattmetro quando il motore asincrono funziona a vuoto; con W_c, i watt pure misurati col wattmetro quando il motore viene bloccato ed assorbe una corrente in corto circuito uguale a quella normale; con W i watt meccanici resi dal motore (potenza in watt presunta del motore) il rendimento è dato da:

$$r = \frac{W}{W + W_v + W_c}$$

Nell'esperienza a motore bloccato la tensione che occorre di dare allo statore è molto inferiore a quella di regime; perciò occorre di avere per questa esperienza un alternatore apposito o un regolatore di tensione. Il rotore in questo esperimento deve mantenersi in corto circuito.

CAPITOLO XII.

Trasformatori ruotanti, raddrizzatori e trasformatori di frequenza.

192. Trasformazione della corrente alternata in corrente continua. — La conversione della corrente alternata in corrente continua si può fare coi seguenti metodi principali:

1.° *Con gruppi motori-dinamo.*

2.° *Coi convertitori o commutatrici.*

3.° *Coi raddrizzatori a vapori di mercurio.*

4.° *Coi raddrizzatori elettrolitici e diodi.*

5.° *Coi raddrizzatori meccanici.*

I primi tre metodi si possono considerare veramente pratici ed industriali.

Il *sistema* 1.°, che è il più semplice, consiste nel fare l'accoppiamento diretto di un motore sincrono od asincrono con una dinamo. La regolazione della tensione continua è indipendente da quella a corrente alternata. Le tensioni delle due correnti sono pure indipendenti. L'avviamento si può fare tanto col motore a corrente alternata, quanto facendo funzionare la dinamo come motore nel periodo di avviamento, qua-

lora però si disponga di una conveniente sorgente di energia a corrente continua (p. es. accumulatori).

Il *sistema* 2.°, descritto al parag. 150, consiste nell'alimentare con corrente mono o polifase l'indotto di una dinamo munita, oltre che del collettore, di opportuni anelli e ricavando la corrente continua dalle spazzole sul collettore. La dinamo funziona rispetto al collettore come generatrice e rispetto agli anelli come un motore sincrono coi poli induttori fissi e indotto mobile; la sua velocità deve essere quella di sincronismo.

Per i convertitori valgono tutte le considerazioni svolte per i motori sincroni sia in riguardo al comportamento, sia in riguardo agli effetti di eccitazione, sia per l'avviamento.

Nei *convertitori* o *converter* o *commutatrici* la tensione ai morsetti della corrente continua è maggiore di quella della corrente alternata e fra la prima e la seconda vi sono i seguenti rapporti:

Numero delle fasi	$Ea : Ec =$
Monofase . . .	0,707
Bifase	0,50
Trifase	0,610
Esafase	0,354

In questa tabella Ea è la tensione della corrente alternata e Ec la tensione della corrente continua. I valori indicati sono esatti se la corrente alternata è di forma sinusoidale; possono variare di una certa percentuale a seconda della forma della corrente ed a seconda che la larghezza dei poli è più o meno grande rispetto al passo polare (cioè a seconda dell'arco abbracciato dalle espansioni polari).

Nel convertitore il circuito indotto compreso fra due spazzole è percorso in ogni istante dalla differenza di due correnti: *una alternativa* che fa da corrente motrice e di forma presso a poco di sinusoide; *una continua* di forma presso a poco rettangolare o trapezia. Per cui (dato che la corrente alternata sia in fase colla f. e. m.) la potenza di cui è capace la macchina è maggiore quando lavora come dinamo, perchè

la corrente nell'armatura è minore nel primo caso che nel secondo. Ma se la commutatrice è alimentata da corrente alternata la quale *non è in fase con la f. e. m.* allora la differenza succitata fra le due correnti alternata e continua aumenta considerevolmente. Da ciò risulta che nella marcia di questa macchina bisogna cercare che non vi sia sfasamento e che cioè cos φ sia uguale a uno.

Essendo con cos $\varphi = 1$ la corrente minore nell'armatura anche la reazione d'armatura è più piccola. Se si provoca un ritardo di fase della corrente alternata diseccitando alquanto il campo induttore, la corrente nell'indotto aumenta e produce un campo magnetico di reazione che fa intensificare il campo induttore e quindi si ha un aumento della tensione della corrente continua.

Viceversa eccitando di più il campo induttore si genera uno spostamento in anticipo di fase nella corrente alternata come nei motori sincroni) che tende a diminuire la tensione della corrente continua. L'aumento o la diminuizione della tensione della c. c. è legata ad uno spostamento di fase della c. a. rispetto alla fase della tensione; da ciò un metodo per ottenere una regolazione della tensione della c. c.

Siccome uno spostamento esagerato di fase può compromettere la marcia della macchina come motore sincrono, perchè si perde molto di coppia, così la regolazione della tensione della c. c. mediante la regolazione del campo induttore deve essere contenuta in limiti ristretti.

Se si vuol avere una regolazione in larghi limiti della tensione continua, bisogna alimentare il convertitore con una tensione alternata derivata da un trasformatore di cui si può far variare il numero delle spire secondarie a mezzo di un inseritore del tipo descritto per gli accumulatori.

L'avviamento dei convertitori si fa: ora colla corrente continua presa da una batteria d'accumulatori facendo funzionare la macchina da motore; ora con motore ausiliario asincrono; ora applicando direttamente la c. c. agli anelli. In questo ultimo caso, all'avviamento, si riduce la tensione alla metà o ad un terzo con un auto-trasformatore e si muniscono le espansioni polari dell'induttore di anelli. Nel periodo di avviamento il campo magnetico prodotto dalla corrente alternata lanciata nell'armatura crea delle correnti indotte nelle

espansioni polari e negli anelli. Per effetto di queste correnti si forma un campo indotto che fa muovere l'armatura; quando la velocità è vicina a quella di sincronismo si eccita il campo induttore.

Invece se l'avviamento è fatto colla corrente continua o con un motore ausiliario, l'immissione della corrente alternata nel convertitore si deve far precedere dalle manovre indicate per fare il parallelo degli alternatori (sistema delle lampadine).

Il 3.° *sistema* per convertire la corrente alternata in continua è basato sulla proprietà che ha l'arco voltaico in un recipiente ermetico in cui fu fatto il vuoto, tra un elettrodo metallico ed uno formato da mercurio raccolto nel fondo del recipiente. In queste condizioni i vapori di mercurio che si sviluppano lasciano passare della corrente soltanto nella direzione dall'elettrodo metallico (anodo) al mercurio (catodo). L'apparecchio si comporta come la valvola di una pompa e cioè se esso vien messo in comunicazione con una derivazione a corrente alternata, lascia passare le ondulazioni di corrente soltanto nel senso dall'elettrodo metallico al mercurio. Mediante combinazioni opportune di trasformatori e di elettrodi si possono utilizzare anche le ondulazioni in senso contrario; si possono raddrizzare anche le correnti trifasi.

I raddrizzatori a vapore di mercurio si facevano con recipienti di vetro; oggi si costruiscono anche con recipienti di ferro e per potenze fino a qualche centinaio di chilowatt, per muovere dei tram. Le installazioni di questi apparecchi per trazione si contano a centinaia.

I *raddrizzatori elettrolitici* o *valvole elettrolitiche* sono formati da un recipiente contenente una soluzione salina (fosfato ammonico), un elettrodo di piombo ed uno di alluminio. Invece del piombo si possono impiegare anche altri metalli o un'asta di carbone. Facendo passare della corrente, l'alluminio si ossida alla superficie e dopo un certo periodo di funzionamento l'ossido acquista questa curiosa proprietà: di lasciar passare soltanto la corrente in un senso (dall'alluminio all'altro elettrodo) e di offrire un'alta resistenza alla corrente in senso contrario. Le molecole d'ossido d'alluminio si comportano come tante valvole microscopiche.

Questi apparecchi non possono essere impiegati che per piccole correnti, per esempio per caricare degli elementi d'accumulatore; esigono molte precauzioni.

Molto diffusi per la carica di piccoli accumulatori per automobili e per la radio sono i *raddrizzatori a valvole ioniche* sia contenenti gaz rarefatti sia ad altissimo vuoto. Questi ultimi si dicono *tubi catodici* o *diodi*.

Essi sono formati da ampolle di vetro e contengono un filamento di tungsteno reso incandescente con una piccola corrente ed un'armatura a disco, a imbuto od a cilindro vicino al filamento. La corrente passa in essi solo dal filamento (catodo) all'armatura (anodo).

I *raddrizzatori meccanici* per corrente monofase sono formati da una specie di collettore a due lamine ruotanti alla velocità di sincronismo della corrente alternata corrispondente a quella di un alternatore a due poli. Applicando due spazzole in posizione opportuna si riesce a raddrizzare una dopo l'altra le singole alternazioni di corrente e raccogliere una corrente che, se non è continua, è però pulsante sempre nello stesso senso. Con questo sistema non si può evitare uno scintillio forte onde il sistema meccanicamente facile fu completamente abbandonato.

193. Convertitori di frequenza. — Queste macchine o gruppi di macchine servono a trasformare la corrente alternata da una frequenza in un'altra. Essendovi in Italia vaste regioni in cui si impiega della c. a. a 50 periodi (Toscana, Liguria, parte del Piemonte, parte della regione lombarda) ed altre in cui si impiegano 42 periodi (regione di Milano, Veneto, Emilia, sud Italia) ed essendovi la necessità di collegare le diverse reti di distribuzione, non è possibile di poter fare i collegamenti se non attraverso a convertitori di frequenza. Queste macchine vanno perciò assumendo una grande importanza.

La trasformazione di una frequenza in un'altra della c. a. non si può fare che attraverso a macchine rotative od a gruppi di due macchine rigidamente accoppiate. I gruppi possono essere formati o da una macchina asincrona (motore a campo rotante) alla frequenza f_1 accoppiata ad una sincrona (alternatore) alla frequenza f_2; oppure da due macchine sincrone di

cui una fa da motore sincrono alla frequenza f_1 e l'altra fa da alternatore alla frequenza f_2. Dato che le frequenze in Italia più impiegate sono 50 e 42 (rapporto 1,19) è impossibile di poter trovare due macchine che accoppiate fra loro meccanicamente possono ruotare con velocità esattamente corrispondenti a quelle di sincronismo delle due frequenze. Abbiam visto che le velocità di sincronismo sono:

	per 42 periodi	per 50 periodi
2 poli	2520	3000
4 »	1260	1500
6 »	840	1000
8 »	630	750
10 »	504	600
12 »	420	500
14 »	360	428
16 »	315	375
18 »	280	333.3
20 »	252	300
24 »	210	250

Le velocità che più si avvicinano sono quelle di 504 giri delle macchine a 10 poli e 42 periodi e quella di 500 giri delle macchine a 12 poli e 50 periodi. Così 252 giri per macchine a 20 poli, 42 periodi e 250 giri delle macchine a 24 poli e 50 periodi. Anche ammesso uno slittamento per il motore asincrono del 3% non si arriva ad avere velocità esattamente pari. Perciò la trasformazione da 42 a 50 periodi a c. a. non è possibile di farla con due macchine se non alterando alquanto una delle due frequenze. Per esempio facendo un gruppo di due macchine sincrone a 250 giri si può trasformare la c. a. da 50 periodi a 14,7 invece di 42. Così se si accoppia un motore asincrono a 8 poli con 42 periodi (avente una velocità di circa 610 giri) con un alternatore a 10 poli si otterrà della corrente alternata a 50,7 periodi.

Queste alterazioni nella frequenza si possono fare quando le corrispondenti reti ed impianti sono piccoli, in modo che è facile aggiustare la velocità dei generatori a mezzo dei regolatori automatici che li comandano.

Così se si dovesse collegare una grande rete a 42 periodi con una piccola a 50 periodi si può formare il gruppo convertitore con due macchine sincrone a 504 giri, ma la frequenza della piccola rete dovrà essere aumentata a 50,4. Il collegamento con macchine sincrone fra due reti a diversa frequenza rappresenta un sistema rigido e cioè la frequenza dell'impianto di minor potenza è determinata da quella rete di maggior potenza. Tra l'una e l'altra frequenza si stabilisce un rapporto costante che dipende dal numero dei poli (come se vi fosse un rapporto di due ruote a ingranaggio).

Il collegamento invece formato con un gruppo asincrono è più elastico e permette una piccola variazione di frequenza nell'impianto di minore potenza. Perciò dovendosi collegare una rete vasta e di grande potenza con una di piccola potenza, si metterà il motore asincrono colla prima rete e l'alternatore collegato alla seconda. Regolando le turbine dell'impianto più piccolo per una frequenza un po' maggiore si ottiene che il medesimo potrà lavorare anche a pieno carico dando energia all'impianto più grande e alla propria rete. Se il carico del piccolo impianto diventa eccessivo la velocità delle turbine si abbassa, allora il motore asincrono subirà uno slittamento in ritardo di modo che la grande rete aiuterà la più piccola. Il gruppo può avere funzione reversibile.

L'avviamento dei gruppi convertitori di frequenza formati da due macchine sincrone si fa generalmente con un motore asincrono ausiliario accoppiato, o con un motore a c. c. Se si impiega un motore asincrono collo stesso numero di poli corrispondente alla macchina sincrona della stessa frequenza si potrà portare il gruppo alla velocità di sincronismo comune, rendendo sincrono il motore asincrono alla fine del periodo di avviamento mediante iniezione di corrente continua nel rotore nel modo indicato al parag. 184. La determinazione dell'istante di accoppiamento sarà fatta con uno dei soliti sistemi per il parallelo degli alternatori. Il collegamento fra due reti a frequenza diversa con un sol gruppo convertitore a macchine sincrone non presenta difficoltà di parallelo; se invece si devono mettere due o più gruppi si presentano difficoltà costruttive e di parallelo che sarebbe troppo lungo il parlarne qui. Queste difficoltà se non sono insuperabili rendono meno semplice il problema onde, ove

appena le condizioni lo permettano, si preferisce l'impiego di gruppi sincrono-asincrono.

Il *motore asincrono come convertitore di frequenza.* Studiando il comportamento del motore asincrono abbiamo visto come nel rotore si svolge una corrente alternata a frequenza decrescente mano mano che il rotore accelera, e precisamente quando il rotore è fermo in esso si ha una frequenza pari a quella dello statore; quando invece il rotore ha la velocità di sincronismo, la frequenza è zero; se la velocità aumenta ancora la frequenza ritorna a crescere; anzi essa riprende lo stesso valore della frequenza dello statore quando la velocità del suddetto rotore è doppia di quella di sincronismo. Frequenze rotoriche maggiori di quelle statoriche si possono ottenere facendo girare il rotore in senso contrario di quello normale o spingendo la sua velocità nello stesso senso oltre il doppio della velocità di sincronismo.

Nel motore asincrono si ha quindi un convertitore di frequenza qualora si allacci lo statore con una rete a frequenza f_1 ed il rotore con un'altra rete a frequenza f_2 ma obbligando però il rotore a ruotare mediante un motore ausiliario, con una velocità che è la media fra le due velocità di sincronismo corrispondenti a f_1 e f_2. Lo slittamento deve cioè essere corrispondente alla velocità della frequenza minore. Per esempio se lo statore di un motore a 2 poli è alimentato con corrente a 50 periodi la velocità del campo rotante è di 3000 giri al 1'. Per creare nel rotore una corrente a 42 periodi bisognerà imprimere uno slittamento di 42 : 50 ossia di 0,84 e quindi un numero di giri di:

$$3000 - 3000 \times 0{,}84 = 480$$

che è appunto la differenza fra 3000 e 2520 che è la velocità di sincronismo delle macchine a due poli con corrente a 42 periodi. Oltre a questa soluzione ve ne sono altre impiegando statori a diverso numero di poli di quelli corrispondenti all'avvolgimento rotorico, oppure facendo correre i rotori a velocità maggiori di quelle di sincronismo. Il motore ausiliario più adatto da accoppiarsi col rotore del motore asincrono reso convertitore di frequenza sarebbe un motore sincrono

alimentato colla corrente a frequenza f_1 del rotore. Non sempre è però possibile di ritrovare motori che soddisfano a tali condizioni. Nel caso sopracitato bisogna accontentarci di una soluzione approssimativa, cioè impiegare un motore sincrono a 10 poli (velocità di sincronismo 504 invece di 480) e quindi si dovrà alterare o l'una o l'altra delle frequenze delle due reti.

Il rapporto di tensione fra quello dello statore e quello del rotore è dato dal rapporto fra il prodotto della frequenza statorica per il numero delle spire e il prodotto della frequenza rotorica per il rispettivo numero di spire. Dell'energia che lo statore fornisce al motore (energia trasformata dal gruppo) una parte viene trasmessa dal rotore direttamente al circuito esterno a frequenza f_2; la parte restante viene trasmessa meccanicamente al motore ausiliario (che effettivamente funziona o da dinamo o da alternatore) e da questo ad un circuito separato oppure allo stesso circuito a frequenza f_2.

La maggior parte dei grandi convertitori da frequenza 50 e 42 periodi a 16,7 periodi richiesti in Italia per la trazione ferroviaria trifase sono formati da una macchina asincrona collegata colla frequenza alta e una sincrona colla frequenza bassa. La regolazione è fatta con reostato di slittamento inserito nell'avvolgimento del rotore dell'asincrono o con sistemi di ricupero speciali della potenza svolta dal rotore asincrono.

SECONDA PARTE

CAPITOLO XIII

Produzione dell'energia.

194. Centrali idroelettriche. — L'energia elettrica per gli usi industriali e di illuminazione viene prodotta in due modi ben distinti: *idricamente* (coll'acqua) e *termicamente* (cioè con dei combustibili) in impianti e fabbricati che si dicono *centrali* in cui viene trasformata l'energia meccanica delle turbine idrauliche a mezzo dinamo e alternatori.

Le *centrali idroelettriche* sono basate sulla utilizzazione dei salti di corsi d'acqua. Se Q è la portata in litri, H il salto disponibile in m. fra il livello d'acqua superiore o di carico e il livello inferiore o di scarico la *energia teorica disponibile* è data:

$$HP = \frac{Q \times H}{75} \text{ oppure } KW = \frac{Q \times H}{102}$$

L'energia elettrica effettiva ricavabile si ottiene moltiplicando gli HP. oppure i KW per il prodotto dei rendimenti delle turbine (,75 — 0,85); delle tubazioni per la condotta dell'acqua (0,95 — 0,98); e degli alternatori o dinamo (0,85 — 0,94).

I rendimenti delle macchine sono forniti dai costruttori caso per caso oppure si possono trovare nei cataloghi.

La portata Q di acqua si misura nei corsi d'acqua:

1.° *cogli stramazzi*; 2.° *colle bocche a battente*; 3.° *col mulinello*; 4.° *con soluzioni di sale*; 5.° *coi galleggianti*.

La misurazione cogli stramazzi si fa sbarrando il corso d'acqua con tavole e obbligando l'acqua a fare una piccola cascata libera attraverso ad una bocca rettangolare a spigoli vivi. Dalla misura dell'altezza della vena stramazzante si deduce la portata in modo esatto usando delle tabelle che si trovano sui manuali. (Fig. 372).

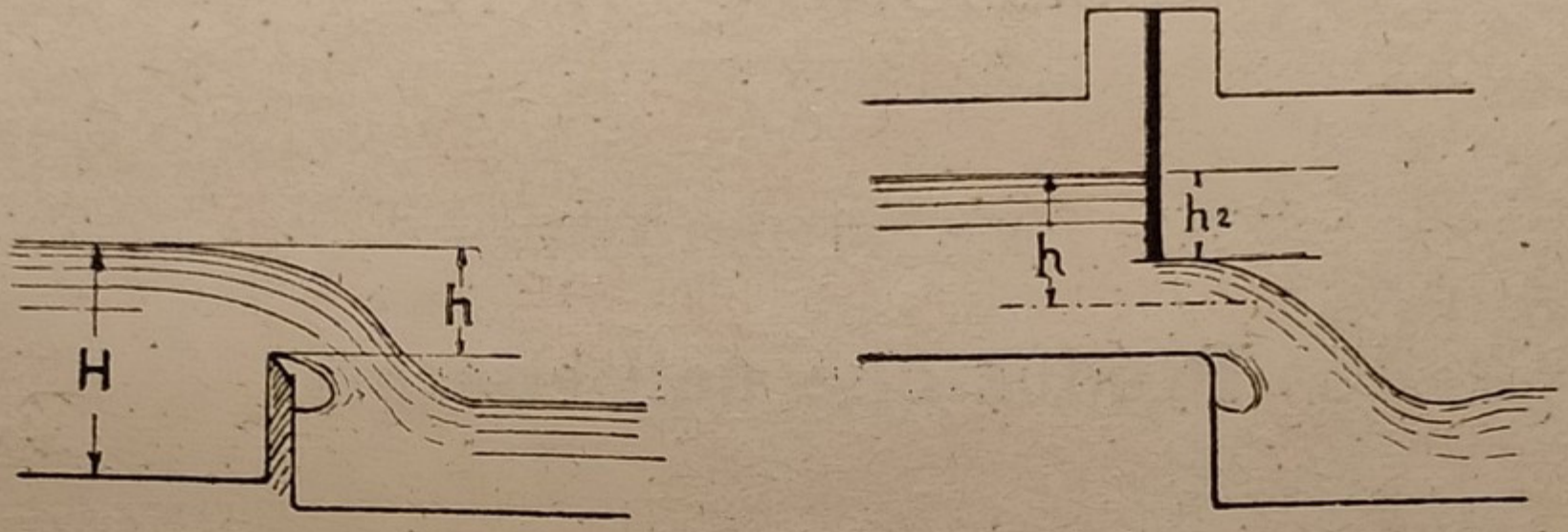


Fig. 372 - Bocche a stramazzo e a battente per misurazione della portata dell'acqua.

La misurazione colle bocche a battente si eseguisce quando lungo il corso d'acqua vi è la possibilità di far passare l'acqua sotto ad una paratoia scaricandola liberamente in forma di cascata attraverso alla bocca. Misurando allora il battente ossia l'altezza d'acqua sul centro della bocca e l'area della bocca stessa si può desumere in modo molto approssimativo la quantità d'acqua usando di formole e tabelle.

Il *molinello* è una piccola ruota a pale elicoidali che si immerge nel corso d'acqua contro corrente ed il cui numero di giri può essere registrato a mezzo di un ruotismo sopra un quadrante. Con misure preventive si fissa quanti giri fa il molinello al minuto primo per determinate velocità d'acqua.

Se immergiamo il molinello in una corrente d'acqua e con ripetute misure rileviamo le diverse velocità che hanno i filetti d'acqua nelle diverse posizioni di una sezione trasversale del canale si potrà ricavare la velocità media V. Allora la portata è data dalla formola:

$$Q = V \cdot S$$

dove Q è espresso in metri cubi, se V è rilevato in metri al minuto secondo e l'area S della sezione in metri quadrati.

La misurazione colle soluzioni saline è la meno impiegata e si adatta per i grandi corsi d'acqua. Consiste nel versare nell'acqua una *soluzione concentrata titolata* di sal marino o altro sale, misurando con analisi chimiche la quantità di sale disciolto nell'acqua ricavata dal corso d'acqua in una posizione molto a valle dal punto di immissione della soluzione titolata, e dove è da ritenersi che il sale si sia sciolto uniformemente. Dal rapporto fra il titolo della soluzione concentrata e quello del corso d'acqua a valle si può conoscere il flusso in mc. al 1".

La misurazione coi galleggianti è la più facile ma la meno sicura nei risultati. Si sceglie un tronco A-B regolare del corso d'acqua: ossia rettilineo, a fondo e sponde regolari. Si misura la lunghezza del tronco (L). A monte si gettano nel mezzo dell'acqua dei galleggianti qualsiasi e con un orologio si conta il tempo (T) in secondi necessario al galleggiante per percorrere il tratto A-B le cui estremità vengono esattamente individuate a mezzo di ponticelli di legno, cordicelle tese, ecc.

Si fanno molte misure e si prende la media dei tempi T.

La velocità dell'acqua al minuto secondo sarà data da:

$$Vm = L : T$$

Questa velocità è quella massima del filone centrale. Per avere la velocità media si moltiplica Vm per coefficienti che variano a seconda della natura delle sponde e del fondo e che si possono ricavare dai manuali. Questi coefficienti variano da 0,70 a 0,80. Dopo di che si rilevano delle sezioni del canale nel tratto L e la superficie bagnata.

Si fa la media S, e si calcola la portata Q colla solita formola:

$$Q = S \times V$$

Principali manufatti di un impianto idroelettrico.

1.° *La diga o travata.* — E' lo sbarramento trasversale al corso d'acqua naturale (fiume o torrente) per elevare alquanto

il livello naturale dell'acqua e per obbligare la corrente a deviare in un canale artificiale.

Le dighe sono di due specie e si adottano a seconda dei casi:

a) *dighe fisse in calcestruzzo o muratura.* Queste dighe sono di pietra o calcestruzzo; hanno spesso un tracciato ad arco od a diagonale per aumentare la lunghezza della cresta ed ottenere nelle piene minor altezza d'acqua.

b) *dighe mobili.* Le dighe mobili si applicano sui fiumi importanti e per grandi masse d'acqua collo scopo di mantenere a monte delle medesime un livello costante e di poter togliere ogni ostacolo al corso durante le piene, ed evitare danni alle sponde, inondazioni e rigurgiti d'acqua. Le dighe mobili sono costruite con grandi paratoie mobili, ora a saracinesca, ora a tubi che rotolano su piani inclinati, ora in forma di grandi ventole.

Vi sono parecchi tipi brevettati di paratoie e dighe mobili *automatiche* le quali automaticamente appena si alza il livello a monte dell'acqua si alzano lasciando libero il deflusso.

2.° *Edificio di presa.* — Spesso alla presa del canale derivatore vi è una imboccatura sbarrata da paratoie a saracinesca od a battente mediante le quali si può regolare l'acqua da immettersi. Alla bocca di presa segue un piccolo tratto di canale in muratura largo, col fondo ribassato ed inclinato affinchè abbiano a depositarsi le ghiaie che entrano dalle paratoie. I depositi di ghiaia possono essere scaricati per mezzo di paratoie nel fiume.

A lato del bacino di presa vi è uno sfioratore il quale serve a scaricare le acque esuberanti che entrano nel canale oltre ad una determinata altezza.

3.° *Canale principale o di scarico.* — All'edificio di presa coi suoi sghiaiatoi e sfioratoi segue il vero canale calcolato con sezione e pendenza opportune. La pendenza varia fra 0.5 e 3 per mille. Di solito ha le sponde e fondo in calcestruzzo e pareti lisciate con cemento. La pendenza varia fra 0,5 (per grandissimi canali in terra) a 2,50 m. al minuto secondo. Sulle falde delle montagne i canali di solito sono in galleria oppure coperti onde impedire la caduta di materiali nel canale.

4.° *Bacini di carico.* — Il canale arrivando presso o sopra l'officina elettrica termina in una vasca più o meno grande dalla quale si staccano le tubazioni che scendono ad alimentare le turbine. La vasca di carico è munita di paratoie o saracinesche all'imbocco delle tubazioni; di una paratoia di fondo per vuotare la vasca in caso di bisogno: di uno sfioratore per smaltire le acque esuberanti in caso di chiusura delle turbine. In tal modo il livello dell'acqua è mantenuto quasi costante nella vasca.

5.° *Tubazioni forzate.* — In testa al bacino di carico si innestano le tubazioni forzate; le bocche vengono munite oltre che dalle sopraccennate saracinesche da *griglie* per impedire il passaggio dei galleggianti che vengono trascinati dalle acque e che potrebbero ostruire e danneggiare le turbine.

Le condotte forzate sono formate da tubi di ferro chiodati longitudinalmente oppure saldati al gaz d'acqua (miscela di idrogeno e aria). I tubi chiodati si adoperano fino a un centinaio di metri di pressione d'acqua; per maggiori pressioni si adoperano quelli saldati e per le pressioni ancor più grandi si impiegano tubi blindati con tanti anelli d'acciaio torniti e infilati a caldo. Si impiegano anche *tubi Manesmann trafilati* a caldo ma questi tubi non si possono fabbricare con diametri superiori a 30 centimetri.

Per le altissime cadute le condotte forzate si fanno con tubi che hanno diametro superiore in alto e inferiore in basso oppure in certi casi, si suddivide la tubazione unica in alto in due o tre tubi di diametro decrescente verso il basso.

La velocità massima nelle tubazioni si tiene da 2 m. a 3 m. al 1". Il diametro dei tubi si calcola non solo in base alla velocità, ma sopratutto in base alla perdita di carico che si vuol assegnare. Questa perdita viene fissata fra il 2 e il 5 per cento della caduta.

Le condotte forzate si posano lungo la falda della montagna per mezzo di muretti alla distanza da 5 a 6 m. ed interponendo delle selle di ferro onde permettere al tubo di scorrere durante la dilatazione e contrazione dovuta ai cambiamenti di temperatura.

I tubi lunghi da 6 a 10 m. vengono giuntati fra loro ora con chiodi sovrapponendo una imboccatura all'altra, ora con

guarnizioni di piombo; ora con flangie e interposizione di guarnizioni di gomma. Le condotte forzate essendo messe a giorno risentono delle variazioni di temperatura dell'acqua e dell'aria specialmente quando si vuotano; devono avere la possibilità di dilatarsi o contrarsi. Perciò, nel mentre i tubi vengono fortemente ancorati nei vertici per mezzo di gettate di calcestruzzo nei tronchi rettilinei vengono innestati dei giunti di dilatazione a cannocchiale con guarnizioni cosicchè ogni tronco può dilatarsi e contrarsi senza pregiudizio della stabilità. La parte inferiore delle condotte forzate, là dove si innestano le derivazioni delle turbine si dice *collettore*.

Altri organi indispensabili nelle condotte sono: le saracinesche a lente scorrevole od a farfalla; le valvole automatiche che si mettono all'imbocco superiore delle tubazioni onde chiudere automaticamente l'ingresso dell'acqua in conseguenza di una rottura dei tubi.

6.° *Serbatoi*. — Negli impianti elettrici ad alta caduta ove vi sia possibilità nelle condizioni del terreno, le acque vengono raccolte in serbatoi o laghi artificiali dai quali si dipartono poi i canali o le condotte forzate. I serbatoi, ove non siano naturali, vengono ottenuti con sbarramenti di valli o con grandi scavi; essi possono essere *stagionali*, *settimanali*, *diurni*.

I serbatoi stagionali sono quelli di maggior importanza perchè permettono di poter accumulare l'acqua esuberante delle stagioni piovose o di scioglimento dei nevai e dei ghiacciai per integrare le magre nelle epoche di scarsità d'acqua. Di solito questi serbatoi hanno milioni di metri cubi di capacità e richiedono opere costose, però *lo sfruttamento delle acque è completo e l'energia ricavabile ha un maggior prezzo*.

I serbatoi *diurni* sono pure molto utili per l'alimentazione di centrali elettriche la di cui energia viene impiegata solo di giorno o in determinate ore di notte. I serbatoi diurni in questi casi permettono di raddoppiare la potenza delle centrali e la produzione in KWore.

Negli impianti con serbatoi stagionali e con grandi dislivelli da pieno a vuoto, i canali di derivazione sono innestati al livello più basso; perciò i canali di solito rimangono sotto pressione. Alle estremità a valle di questi canali dove

si imboccano le condotte forzate vengono innestati dei *pozzi piezometrici* che sono serbatoi piccoli ma alti più del livello del grande serbatoio. Essi servono a dare sfogo all'acqua sopra alle condotte forzate in caso si improvvisa chiusura delle turbine ed evitare così colpi d'ariete nel canale sotto pressione derivato dal grande serbatoio.

Turbine idrauliche. — Le turbine si costruiscono secondo due tipi ben distinti: 1.° *Tipo a reazione Jonval o Francis;* 2.° *Tipo ad azione o Pelton.* In tutte vi sono due organi principali: il *distributore* e la *ruota.* Il distributore serve a dirigere l'acqua secondo dei getti in determinate direzioni verso la ruota la quale, essendo munita di pale, è obbligata a ruotare trasmettendo il lavoro all'albero. Nelle *turbine Francis* il distributore investe tutta la ruota ed è formato da

Fig. 373 - Ruota di turbina Francis.

tante palette mobili che possono aprirsi e rinchiudersi l'una sull' altra regolando l' efflusso. Se la turbina ha la ruota sopra il livello dell'acqua del canale di scarico la velocità con cui l'acqua sorte dal distributore è determinata non solo dalla pressione superiore al distributore, ma anche dalla forza di aspirazione della colonna d'acqua sotto alla turbina. Tale velocità è espressa dalla formola:

$$V = f\sqrt{2\,gh}$$

f — un coefficiente che varia fra 0,65 e 0,85.
g — accelerazione della gravità (ossia 9,81)
h — dislivello fra il pelo d'acqua di carico e quello di scarico.

La velocità periferica della ruota è di circa 1/2 della velocità V. Ma perchè l'effetto di aspirazione o di reazione possa verificarsi è necessario che l'acqua uscendo dalla turbina sia accompagnata da un tubo sotto al livello dell'acqua nel canale di scarico di 0,25 a 0,30 cm. almeno, affinchè non possa entrare l'aria per disotto. L'altezza di aspirazione sotto la ruota può arrivare al massimo fino a 6-7 m. (teoricamente 10 m.) perchè per altezze maggiori potrebbe formarsi il vuoto ed uno stacco della colonna aspirante.

Le turbine Francis si adoperano per piccoli salti e per salti limitati.

Nelle *turbine ad azione Pelton* il distributore si riduce a uno o due getti d'acqua che sortono da bocche tubolari. Si dicono *iniettori od ugelli*. Ogni ugello contiene uno *spillo* a forma di fuso appuntito il quale spostandosi in dentro od in fuori della bocca dell'ugello regola l'acqua di efflusso. La forma dello spillo è studiata in modo che il getto d'acqua, piccolo o grande, ha sempre una sezione circolare. La turbina Pelton avendo il suo getto libero nell'aria non può avere

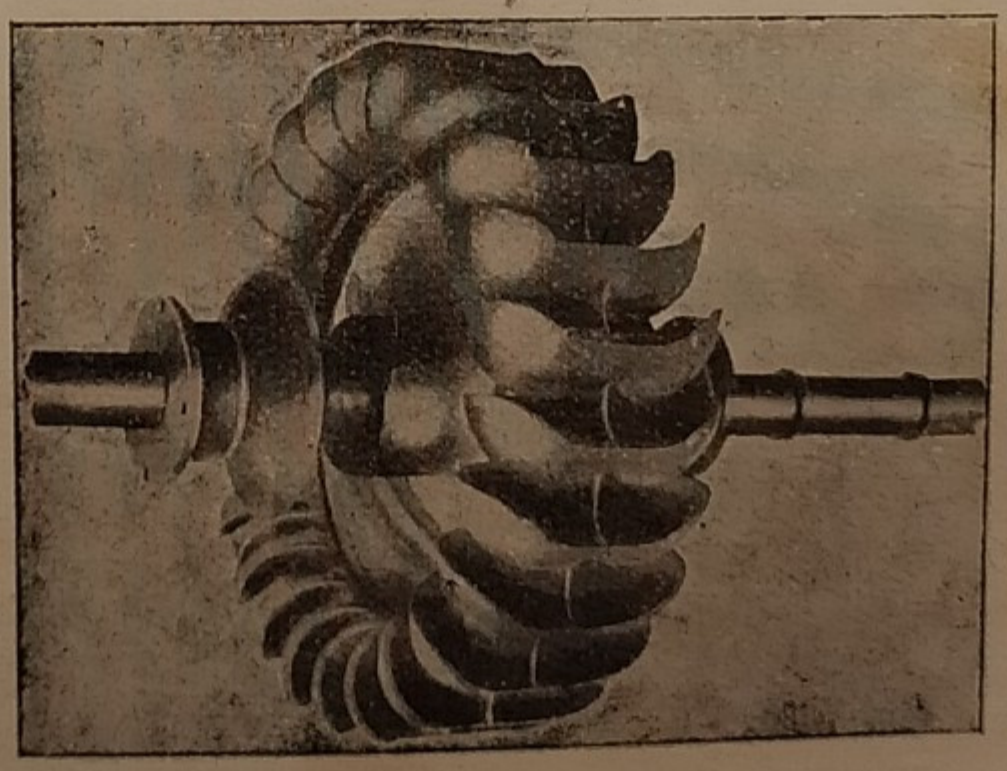


Fig. 374 - Ruota Pelton.

effetto di reazione. La ruota della turbina Pelton è formata da un disco d'acciaio sul contorno del quale sono fissati solida-

mente delle palette a forma di cucchiai. Queste turbine sono adattate per grandi salti.

Da qualche anno vien costruito un nuovo tipo di *turbina a reazione* detto *rapido* oppure a *ruota elicoidale* perchè questa invece di avere tante palette all'ingiro porta solo tre o quattro pale ad elica della forma presso a poco delle pale dei ventilatori o delle eliche delle navi. Queste turbine si adoperano solo per piccoli salti (fino a 6-7 m.) e per grandi masse d'acqua avendo il vantaggio di dare velocità dal doppio al triplo delle Francis. Il distributore è come quello delle turbine Francis.

A seconda del modo di installazione le turbine si dividono anche:

a) *turbine a camera libera* cioè installate in camera di calcestruzzo in diretta comunicazione col canale di carico. Si applicano per basse cadute (1.50 - 10 m.)

b) *turbine a camera forzata* sono le turbine racchiuse in recipienti di ferro o di ghisa ed in comunicazione col canale mediante tubi. A seconda della forma del recipiente si distinguono in camere cilindriche e in camere a spirale. Infine vi sono *turbine ad asse orizzontale* e turbine ad *asse verticale*; l'accoppiamento delle turbine cogli alternatori si fa sia con puleggie e cinghie sia *diretto* o *coassiale* mediante *giunti rigidi* oppure *giunti elastici*.

Negli impianti con condotte forzate lunghe e cadute ragguardevoli si presenta il pericolo del *colpo d'ariete* dovuto ad una improvvisa chiusura del distributore a pale per le Francis o a spillo per le Pelton. Il colpo d'ariete è una sopra-pressione subitanea dovuta alla forza viva della colonna d'acqua in moto nei tubi; questa sovrapressione è proporzionale alla massa d'acqua e alla velocità e dipende dal tempo in cui si opera l'arresto dell'acqua. Il colpo d'ariete può far rompere i tubi ed essere causa di danni enormi.

Per ovviare a questo pericolo tutte le turbine per cadute alte o medie vengono provviste di dispositivi per una lenta chiusura nel distributore o dello spillo (da 1,5 a 5 secondi). Siccome però durante questa chiusura lenta, se la turbina è una Pelton, la ruota potrebbe assumere velocità troppo forti, così queste turbine, negli impianti un po' importanti, vengono munite di uno schermo o tegolo il quale appena la velocità

della ruota tende ad elevarsi devia il getto dell'acqua. Quando la velocità si rimette al numero normale di giri il tegolo si sposta alla posizione di riposo. Nelle turbine Francis si impediscono i colpi d'ariete mediante i così detti *scarichi sincroni* che sono delle valvole le quali al verificarsi di una sopra-pressione scaricano l'acqua della tubazione direttamente nel canale di scarico. Queste valvole poi si rinchiudono lentamente. Sono, però apparecchi poco usati. Quasi tutte le turbine, specialmente a forti velocità, vengono munite di volani. Il volano insieme alle masse ruotanti degli alternatori accoppiati ha l'ufficio di regolare la velocità delle turbine quando il carico degli alternatori avesse ad essere attaccato o staccato di colpo mediante la chiusura od apertura degli interruttori di corrente. In questi casi lo *scarto di velocità* deve essere contenuto in dati limiti onde dar tempo al regolatore della turbina di chiudere od aprire il distributore in un tempo necessario per non produrre colpi d'ariete.

Esempio:

Stacco di potenza	1/2	1/4	totale	
Scarto di velocità	3	6	15	%

Il volano viene appunto calcolato in modo che col suo peso e scarto di velocità abbia ad assorbire una forza di un certo numero di HP in un certo numero di secondi.

Completano il gruppo delle turbine i *regolatori automatici di velocità*, i quali hanno l'ufficio di mantenere la variazione di velocità da carico zero a carico massimo entro limiti ristretti — di solito del 3 al 5 per cento — aprendo o chiudendo il distributore della turbina. I moderni regolatori si costruiscono secondo il principio del *servomotore* a pressione d'olio e cioè la forza ingente necessaria per aprire o chiudere l'organo distributore è data da uno stantuffo che si muove in un cilindro sotto la pressione data da una pompa. L'immissione di questo liquido sopra una faccia o l'altra dello stantuffo è regolata da un piccolo distributore il quale è comandato a sua volta (con piccolissima forza) da un pendolo a rotazione, a mezzo di leve ed aste.

Gli organi principali di un talo regolatore sono:

1.° *Il pendolo centrifugo* formato da una scatola tonda contenente due masse di ferro tenute da molle regolabili. Ad

ogni variazione di velocità del pendolo (mosso dalla turbina con cinghia) le masse divaricano o si restringono comunicando il movimento a mezzo di leva orizzontale all'organo distributore.

2.° *Il distributore* è formato da uno stantuffo con intagli che si muove in un cilindretto. Spostandosi appena di qualche millimetro dirige il flusso di olio della pompa sotto pressione nel grande cilindro di comando del distributore.

3.° *Una pompa d'olio* di solito rotativa munita di una valvola di sicurezza e che crea una pressione di 4-5 atmosfere.

4.° *Un organo di comando del distributore.* Completano il regolatore altri dispositivi che limitano la corsa dell'organo di comando, la velocità della corsa stessa, ecc.

195. Quadri di manovra e di distribuzione. — Si dice *quadro* il complesso degli apparecchi manovratori e misuratori della corrente nonchè di protezione dei circuiti degli impianti elettrici.

Nelle piccole installazioni per motori o per smistamento di linee di illuminazione i quadri si riducono a lastre di marmo o di ardesia nera lucidata dello spessore di 2,5 - 3 cm., addossate alle pareti e portanti gli strumenti. Di solito si lascia tra questo quadro e parete una intercapedine di 25 a 40 cm. ed i conduttori vengono fissati ed attaccati nella parte posteriore del quadro.

Quando invece si tratta di centrali o sottostazioni di trasformazione i quadri sono composti da robuste inteleiature di ferro in modo da costituire delle gabbie dell'altezza di m. 2 a 2,20 e di larghezza di m. 0,70 - 1,20. Nell'interno di esse si mettono le sbarre di rame, gli interruttori sia ad alta che a bassa tensione, i riduttori di corrente e di tensione, i reostati ed altri apparecchi. Sulla facciata anteriore si allineano gli strumenti di misura, le piastre dei volantini di comando degli interruttori, ecc. Tutto il resto del quadro viene riparato da lamierini o reti metalliche onde impedire ogni possibile contatto diretto e pericoloso fra il personale e le parti sotto tensione chiuse nelle inteleiature.

La distanza minima libera fra conduttori e verso altri oggetti per conduttori nudi o non sufficientemente rivestiti si tiene di un centimetro per ogni 1000 V. con un minimo di 6 cent. per i conduttori di bassa tensione; 7 centimetri fino a 5000 V.; 10 centimetri per tensioni maggiori.

I quadri di marmo vengono divisi in tanti *pannelli* ognuno dei quali comprende gli apparecchi di una macchina, di una linea, di un speciale riparto.

Nelle grandi centrali gli interruttori automatici, i riduttori di corrente e tensione, i coltelli di sezionamento assumono tali proporzioni da non poter essere contenuti nelle gabbie di ferro. Gli apparecchi e le sbarre si mettono dove fa più comodo contro pareti, attaccati ai soffitti, ecc. tenendo in ogni caso ben lontani da ogni possibile contatto i conduttori di alta tensione. Il comando degli interruttori lo si fa da un quadro centrale per mezzo di motorini elettrici, senza sforzo, premendo bottoni o manovrando piccoli interruttori a leva. Il quadro centrale porta gli strumenti indicatori delle macchine, linee, trasformatori; apposite luci rosse o verdi segnalano se gli interruttori sono aperti o chiusi. In tal modo il capo elettricista può controllare i complessi circuiti della centrale, il carico delle macchine, la tensione, ecc.; egli può attaccare e distaccare i circuiti provvedendo ad un esatto funzionamento e regolazione senza spostarsi dal suo posto di sorveglianza.

Apparecchi di manovra. — Costituiscono la *apparecchiatura* dei quadri oltre agli strumenti misuratori già descritti:

1.° Gli interruttori e commutatori della corrente che possono essere unipolari, bipolari, tripolari; si distinguono anche in interruttori a leva o ad apertura in aria, interruttori in olio; abbiamo interruttori per bassa tensione e per alta tensione; con comando a mano ed automatico.

Gli interruttori in olio molto diffusi per alte tensioni e per grandi amperaggi anche a bassa tensione, hanno i contatti di interruzione immersi nell'olio minerale. Si dicono *automatici* quando l'apertura si opera da sè al verificarsi di date condizioni ad esempio: per eccesso di corrente (interruttori a massimo); per tensione o per corrente zero (interruttori a

minimo), ecc. Lo scatto di apertura avviene per mezzo di nottolini comandati da un elettromagnete; l'apertura dei contatti principali avviene sempre per aiuto di molle potenti.

I dispositivi elettromeccanici che determinano lo scatto degli interruttori si dicono *relais* e di essi ve ne sono varietà infinite per tutte le esigenze di servizio e col solo scopo di proteggere macchine e circuiti da eventuali danni, per sovratensioni e sovracorrenti.

La chiusura degli interruttori automatici sia in aria che in olio si fa normalmente a mano; però per impianti importanti si applica anche la chiusura elettrica (grossi elettromagneti) o pneumatica comandata a distanza da un semplice bottone o da un piccolo interruttore.

2.° Le *valvole fusibili* sono formate da fili di una lega piombo - stagno o d'argento che si inseriscono nelle condutture elettriche, di spessore calcolato in modo che abbiano a fondersi allorchè la corrente supera determinati limiti. Si impedisce così che le condutture stesse o gli avvolgimenti delle macchine abbiano ad arroventarsi per eccesso di corrente nel caso specialmente di corti circuiti. Le valvole si adoperano per circuiti a bassa tensione fino a qualche centinaio di ampère e per alte tensioni moderate (20 - 30 mila volt) con qualche decina di ampère. Oltre questi limiti si adoperano interruttori automatici in olio.

3.° *Coltelli separatori.* — I coltelli separatori sono interruttori a leva di costruzione molto semplice, senza apertura a scatto, che si mettono sui circuiti a bassa, alta e altissima tensione per interrompere in modo ben visibile i circuiti. Si chiudono e si aprono a mano con aste di legno portanti isolatori detti *fioretti*. Non avendo scatto rapido questi apparecchi si manovrano sotto tensione ma non quando circola corrente per evitare la formazione di archi voltaici in aria molesti e pericolosi. Anche di questi coltelli vi sono parecchi tipi adatti per interni di officine, ed esterni su pali, ecc.

I coltelli si mettono sui circuiti delle macchine, delle linee, sbarre, ecc. per separare *visibilmente* i tronchi e permettere smistamento di correnti e riparazioni sui quadri con sicurezza per il personale.

Regole di sicurezza per installazioni dei quadri e dei conduttori nelle centrali e sottostazioni sono contenute in un Regolamento pubblicato dalla Associazione Elettrotecnica Italiana. Fra le regole principali ricordiamo:

1.° Tutti gli strumenti e apparecchi sui quadri di marmo devono essere a bassa tensione cioè non superiore a 600 V a corrente continua e 300 V a corrente alternata. Tutto quanto si trova a tensione superiore deve esser posto dietro ai quadri o lontani da ogni possibile contatto con il personale addetto all'esercizio.

2.° Tutte le parti di un quadro ed apparecchi devono essere di materiale incombustibile; le parti di ferro devono essere messe in buona comunicazione colla terra.

3.° Nei passaggi dietro ai quadri ed ai fili sotto tensione si devono tenere larghezze e altezze sufficienti per il transito senza pericolo per il personale e precisamente una larghezza minima di 0.80 se i conduttori sono posti da un sol lato e m. 1.40 se i conduttori sono dai due lati del passaggio.

4.° Ogni gruppo o sezione di quadro e cioè comprendente gli apparecchi di una macchina o di una linea o sezione di sbarre ecc. deve essere protetto a monte od a valle da dove può arrivare corrente da gruppi di coltelli separatori.

5.° In ogni centrale il servizio di comando deve essere affidato ad un sol capo e nessun operaio deve entrare nei locali pericolosi se non autorizzato ed accompagnato. Le manovre con fioretti si faranno stando su sgabelli isolanti; ai manubri degli interruttori alta tensione si applicheranno cartelli indicanti *chiuso* od *aperto*, o meglio sistemi di blocco in modo che non riesca facile una manovra intempestiva.

Se si deve levare tensione dalle linee o da riparti per riparazioni, esse saranno messe provvisoriamente a terra.

Infine nelle officine l'illuminazione deve essere abbondante, sicura; deve regnare la massima pulizia ed il massimo ordine.

Studio dei quadri. — Lo studio del progetto di un quadro deve essere preceduto dal disegno dello *schema* d'impianto

con segnati: sbarre primarie e secondarie, linee di arrivo e partenza, scaricatori, coltelli di sezionamento, interruttori e commutatori, riduttori di tensione e corrente, amperometri, wattmetri, voltmetri, reostati, valvole, connessioni fra apparecchi e strumenti, ecc. ecc. Sulla scorta dello schema e del disegno del locale a disposizione si disegna il quadro mettendo a posto in opportune viste, piante e sezioni, tutti i conduttori coi relativi isolatori, apparecchi e strumenti e le intelaiature di ferro. A seconda delle tensioni si devono regolare le distanze fra i conduttori e colle parti metalliche in modo che vi sia l'assoluta sicurezza contro il pericolo di archi voltaici.

196. Centrali termoelettriche. — Le centrali termoelettriche sono in Italia un complemento necessario alla produzione idroelettrica dell'energia distribuita per le industrie e per l'illuminazione; esse servono a integrare il fabbisogno durante i periodi di magra ed assicurare il servizio in caso di rottura o riparazione delle grandi linee di trasmissione. La posizione delle centrali termoelettriche è determinata oltre che dalla vicinanza della plaga di consumo dell'energia o di centri di grandi linee di trasmissione, dalla necessità di avere un rifornimento rapido e poco costoso del carbone nonchè dalla presenza di acque abbondanti per l'alimentazione delle caldaie e dei condensatori. Una stazione di 1000 KW esige una tonnellata circa di carbone e 350 mc. d'acqua all'ora; occorre di stivare nei silos di carbone 1000 tonnellate per ogni milione di KW-ora che occorre di produrre.

Una centrale elettrica a vapore consta di due reparti: Caldaie e Macchine. Il reparto caldaie comprende oltre le medesime i silos per il carbone, vasche per l'acqua di alimentazione, ventilatori, i recipienti di olio pesante ecc. Le caldaie usate modernamente sono formate da grandi fasci inclinati di tubi d'acqua fra i quali passano le fiamme; i fasci sono raccordati alle estremità da tubi collettori i quali sboccano in serbatoi cilindrici superiori ove si raccoglie il vapore prodotto. La disposizione dei fasci e dei tubi collettori è tale da produrre una viva circolazione. Il tipo più diffuso da noi è quello Babcock e Wilcox inglese, e Franco Tosi italiano. La pressione del vapore si tiene da 12 a 24 atmosfere.

Oltre al carbone si adoperano in Italia: la lignite nelle centrali che si trovano presso le miniere, l'olio nero o *mazut* residui della distillazione del petrolio. Il potere calorifico del carbone è di 6000 a 7000 calorie; quello della lignite da 5000 a 5500; quello dell'olio pesante di 10.000 circa.

In tutti gli impianti a carbone il caricamento del carbone si fa automaticamente. Il carbone dei silos posti sopra alle caldaie scende nelle tramoggie davanti al focolare e da questo vien distribuito automaticamente sulle griglie. Nei moderni impianti la combustione viene regolata in modo da ottenere la massima utilizzazione del calore prodotto misurando la temperatura di uscita dei gaz e la quantità di acido carbonico che è il prodotto ultimo della combustione.

Il vapore prodotto dalle caldaie direttamente è umido, cioè porta con sè goccioline d'acqua inutili e nocive. Per ottenere vapore asciutto prima di utilizzarlo nelle macchine a vapore lo si fa passare attraverso ai *surriscaldatori* che sono fasci di tubi che si mettono nella stessa camera di combustione delle caldaie. Per esempio: per 12 atmosfere il vapore prodotto a 188° viene surriscaldato da 250° a 300° a seconda della pressione.

Gli *economizzatori* utilizzano il residuo calore del fumo prima di passare al camino per riscaldare l'acqua di alimentazione portandola alla temperatura di 80° a 150°. Gli economizzatori sono formati da fasci di tubi verticali percorsi dall'acqua di alimentazione. Sono montati entro casse di muratura in cui passa il fumo. I tubi sono raschiati e puliti da raschiatoi che si muovono automaticamente con moto alternativo.

L'alimentazione d'acqua delle caldaie viene fatta per mezzo di pompe a stantuffo o centrifughe; l'acqua naturale viene generalmente depurata dalle materie calcaree sciolte e che potrebbero incrostare i tubi bollitori ed i corpi delle caldaie mediante speciali depuratori e colla immissione di sostanze atte a far precipitare le materie incrostanti.

Data la grande massa di carbone e ceneri che bisogna importare ed esportare dalle caldaie, negli impianti appena un po' importanti, vi è un sistema di trasportatori o conveyor formato da catene sostenenti dei recipienti che scorrono in

modo continuo sotto le caldaie o sopra i silos del carbone trasportando i materiali e versandoli nei posti opportuni.

Nelle centrali a vapore moderne sono ormai scomparse le macchine a stantuffo e sostituite con *turbine a vapore*. Le turbine si compongono di una camera cilindrica che forma il corpo della macchina e di un tamburo interno d'acciaio girevole coassiale al corpo. Sia la parete interna della camera che la superficie del tamburo sono coperte da tante corone di palette metalliche a forma di tegolo coi labbri a coltello in modo che tra gli ordini consecutivi di palette fisse dette *direttrici* girano le corone delle palette mobili del tamburo con un piccolissimo giuoco.

Le palette fisse e le mobili sono ricurve in senso contrario. Il vapore ad alta pressione che proviene dalle caldaie entrando da una serie di ugelli ad una testata della camera secondo una direzione tangenziale batte sul primo ordine di palette mobili: quindi passa attraverso il primo ordine di palette fisse al secondo ordine ecc. Le corone di palette sono crescenti di grandezza perchè il volume del vapore passando verso lo scarico aumenta continuamente. Il vapore d'ingresso viene regolato attraverso saracinesche comandate da regolatori automatici di velocità. Le turbine a vapore sono caratterizzate da un grande numero di giri; esse fanno da 750 (grandissime macchine) a 4000 giri al minuto primo. La lubrificazione è fatta con metodi speciali facendo circolare l'olio dei supporti entro serpentine poste in acqua fredda. Il vantaggio delle turbine in confronto di quelle a stantuffo è il molto minor spazio occupato. Le turbine a vapore si costruiscono per potenze da qualche chilowatt a molte migliaia di chilowatt. In America si sono installate turbine da 100 mila KW.

Il consumo di combustibile per KW-ora prodotto si calcola:

Piccole centrali fino a 1000 HP.	da 1,2 a 1,5 Kg.
Grandi centrali	» 1 a 1,2
Grandi centrali perfezionate	» 0,65 a 0,8

CAPITOLO XIV.

Condutture elettriche per trasmissione e distribuzione dell' energia.

197. Classificazione. — Le condutture elettriche si distinguono a seconda della tensione, qualità di corrente, inserzione degli apparecchi utilizzatori e generatori, costruzione meccanica ecc.

1.° *A seconda della tensione* si distinguono in *condutture a bassa tensione* quelle che arrivano a 600 V. corrente continua e 300 V. corrente alternata e in *condutture ad alta tensione* le altre. Talvolta si distinguono anche le condutture ad *altissima tensione* quelle che vanno da 60 - 80 mila volt a 220 mila, che è la più elevata tensione applicata per trasmissione di energia.

2.° *Dalla corrente impiegata* nella trasmissione si distinguono quelle a corrente continua e quelle a corrente alternata monofase, bifase, trifase.

3.° *Dal modo di inserzione degli apparecchi utilizzatori della corrente* (lampade, motori ecc.) e dei generatori si distinguono *in linee di trasmissione e distribuzione in derivazione e in linee in serie.* Le prime sono molto più diffuse e sono caratterizzate dal possedere una tensione quasi costante sui fili (salvo le inevitabili perdite) e dell'avere tutti gli apparecchi utilizzatori attaccati in derivazione. Le linee di distri-

buzione dell'energia con questo sistema vengono a costituire con tutte le linee derivate delle vere reti a maglie. Queste reti ora ad alta ed ora a bassa tensione, con trasformatori interposti, si stendono sopra le regioni e negli abitati diffondendo l'uso della energia elettrica.

Il sistema in serie a corrente continua (detto Thury), — con tensione variabile e intensità costante — è ormai quasi scomparso, però essa ebbe nel passato diverse applicazioni.

Il sistema in serie a corrente alternata si adopera tutt'ora in diverse grandi città e tende anzi ad estendersi per l'illuminazione stradale. In questo sistema le linee formano tanti anelli chiusi e sono derivate dai morsetti di trasformatori a tensione variabile ed intensità costante; nelle linee ad anello sono incluse centinaia di lampade in serie.

4.° *Dal modo di costruzione delle linee esse si classificano* in *condutture aeree, condutture sotterranee* o in cavo, *condutture interne* alle case o stabilimenti.

Dovendosi costruire una linea il problema principale che si presenta ogni volta è quello economico e cioè di ottenere lo scopo colla minor spesa. Siccome la spesa maggiore è quella del filo di rame o di alluminio, così si cerca di elevare il più possibile la tensione e di ridurre proporzionalmente la corrente affinchè la perdita RI^2 sia la minima pur impiegando fili sottili e cioè di resistenza elevata. Ma la tendenza ad elevare la tensione ed a ridurre la sezione dei fili viene limitata: 1.° dal costo degli isolatori ed apparecchi il cui prezzo cresce colla tensione; 2.° dalla necessità di limitare ad un minimum la sezione onde non compromettere la solidità meccanica e quindi la sicurezza di trasmissione dell'energia e la incolumità pubblica. Perciò delle norme generali di sicurezza della Associazione Elettrotecnica Italiana hanno stabilito che per le linee ad alta tensione aeree non si debba impiegare fili di sezione minore di 10 mmq. di rame e per campate limitate.

Un'altra limitazione all'elevazione della tensione è data dal fenomeno corona (parag. 16) il quale produce delle perdite proporzionali al quadrato della tensione e alla radice quadrata del rapporto fra il diametro dei fili e la loro distanza. Così ad esempio con fili di 10 mm. di diametro occorre

per trasmissioni a 150 mila Volt di tenere una distanza fra i fili di 3,50 a 4 m.

198. Calcolo della sezione dei conduttori. — Di solito dovendosi costruire una linea vengono fissati la lunghezza *l*, la tensione E, fra i fili all'inizio della linea, l'intensità I massima da trasmettersi oppure i chilowatt e nei casi di corrente alternata, il fattore di potenza. Resta a determinarsi la sezione dei fili. Ma poichè dalla sezione dipende la caduta di tensione che la corrente provoca lungo i fili e l'energia perduta per effetto Joule, così è necessario di fissare anche tali perdite come si vuole. Di solito le perdite assegnate alle trasmissioni lunghe parecchi chilometri si mantengono fra il 5 e il 10 per cento della tensione di linea o dell'energia trasmessa. Per linea a bassa tensione la perdita si limita al 2-5 per cento della tensione. Il criterio per fissare la percentuale di perdita ha il suo fondamento specialmente in ragioni economiche. Dove l'energia è costosa si assegna alla linea una perdita più bassa e cioè si adoperano fili di maggior sezione e quindi più costosi.

Talvolta le linee sono già costruite; allora interessa controllare quale è la perdita in volt od in watt per una data potenza di trasmissione. Oltre alle perdite di tensione RI nei fili, quando si tratta di trasmettere correnti alquanto intense a grandi distanze si presentano le *perdite induttive* dovute alla selfinduzione (parag. 79). Esse hanno origine dai flussi magnetici alternativi che si formano intorno a ciascun conduttore suscitandovi una f. e. m. di autoinduzione in ritardo di 90° rispetto al periodo della corrente. Per linee ordinarie con fili di rame di 8-10 mm. posti a 75 cm. di distanza la perdita ohmica RI è presso a poco uguale a quella induttiva $2 \pi fLI$ cioè la resistenza e la reattanza (a 90°) sono uguali. Le perdite induttive sono molto sentite anche nelle condutture a bassa tensione con forti intensità. Diamo più avanti le formole di calcolazione.

Un'altra causa di alterazione della tensione nelle grandi linee di trasmissione ad alta tensione è data dalla capacità dei fili paralleli e in misura molto maggiore dai cavi sotterranei. (Vedi parag. 12-13-85, ecc.)

Questo effetto può essere trascurabile con linee aeree fino a 100 chilometri e 20 e 30 mila volt di tensione; ma per ten-

sioni e lunghezze maggiori la capacità dei fili provoca: 1.° un sensibile aumento di corrente dovuto alla componente di capacità in avanzo di 90° sulla tensione; 2.° Un aumento di tensione dall'inizio verso la fine della linea quando la corrente utile o di carico è molto minore della corrente di capacità. Questo effetto è conosciuto sotto il nome di effetto Ferranti perchè è stato osservato da questo elettricista nella posa di cavi ad alta tensione a Londra. L'effetto sta a dimostrare che non si possono sempre lasciare libere le estremità d'arrivo delle grandi linee ma che bisogna tenerle sempre attaccate ai trasformatori.

(Limiteremo le formole per il calcolo delle linee ai casi più semplici e più frequenti che danno risultati precisi quando si tratti di lunghezze non oltre cento chilometri e con tensioni di 40 a 70 mila volt.

1.° Caso. — *Trasmissione con linea a due fili per corrente continua o monofase con cos* $\varphi = 1$; induttanza di linea trascurabile. (Fig. 375).

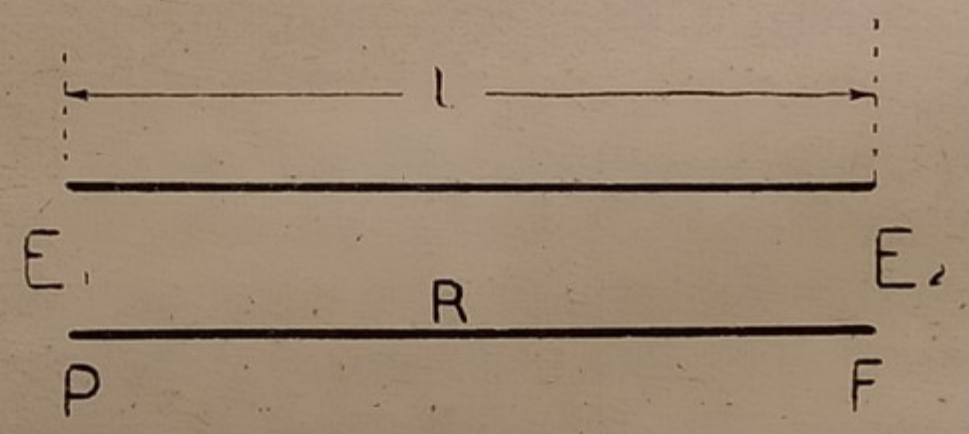


Fig. 375 - Schema di linea a due fili.

Il caso è già stato trattato al parag. 27. La sezione s dei conduttori è data dalla formola:

$$s = \frac{2\,\rho\,l\,I}{P} \qquad (1)$$

dove: ρ è la resistività; P la perdita *assoluta* in volt assegnata alla linea ($P = E_1 - E_2$). La resistività del rame puro è 0,017 (per prudenza si adopera spesso 0,02). I è l'intensità in ampère.

Chiamando p la perdita percentuale (in frazioni di unità) di tensione all'inizio della linea evidentemente sarà:

$$P = p\,E_1$$

Sostituendo nella (1):

$$s = \frac{2\,\rho\,l\,I}{p\,E_1}$$

Moltiplicando i termini del 2.° membro per E_1 e tenendo conto che $E_1 I$ rappresenta in watt W l'energia trasmessa:

$$s = \frac{2\,\rho\,l\,W}{p\,E_1^2}$$

In questo caso *p* può rappresentare tanto la perdita percentuale di tensione quanto la perdita percentuale di potenza.

2.° Caso. — *Trasmissione con linea monofase e carico induttivo.* Sia *p* la *perdita percentuale di potenza.* Adottando le notazioni precedenti e chiamando R la resistenza di ciascun filo, la perdita sarà rappresentata (Legge di Joule) da RI^2 ossia:

$$p\,E_1\,I\cos\varphi = 2\,R\,I^2 = \frac{2\,\rho\,l}{s}\,I^2$$

da cui si cava:

$$s = \frac{2\,\rho\,l\,I^2}{p\,E_1\,I\cos\varphi}$$

riducendo e moltiplicando i due termini della divisione per $E_1 \cos\varphi$ si ha:

$$s = \frac{2\,\rho\,l\,I\,E_1\cos\varphi}{p\,E_1^2\cos\varphi^2} = \frac{2\,\rho\,l\,W}{p_1^2\cos\varphi^2}$$

dove W è l'energia trasmessa in watt.

La perdita di tensione è più facile a calcolarsi col disegno vettoriale. (Fig. 376).

Sia O E_2 il vettore della tensione di arrivo e I quello dell'intensità in ritardo dell'angolo φ. La perdita R I di tensione è in fase con I e perciò da E_2 si conduce una parallela a O I per una lunghezza pari a 2RI. Il vettore O E_1 rappresenta in lunghezza e in fase la tensione al punto di partenza della linea.

La perdita di linea sarà data dalla differenza $OE_1 - OE_2$.

Si osserva che l'angolo φ_1 è più piccolo di φ ossia la resistenza di linea migliora il fattore di potenza del carico all'estremità di partenza.

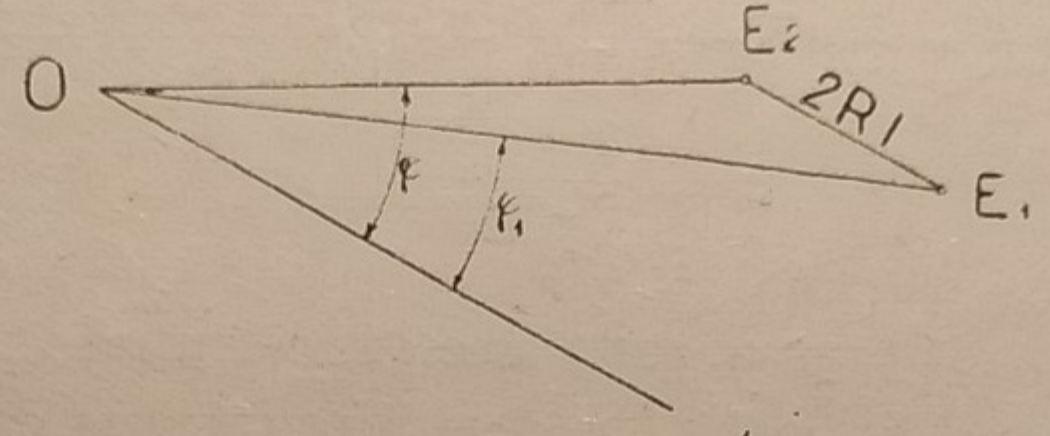


Fig. 376 - Diagramma vettoriale delle tensioni di una linea.

3.° Caso. — *Trasmissione con linea trifase e carico induttivo.* Esprimiamo, come precedentemente e colle stesse notazioni, che la frazione di perdita di energia trasmessa è uguale alle perdite nei tre fili (RI²).

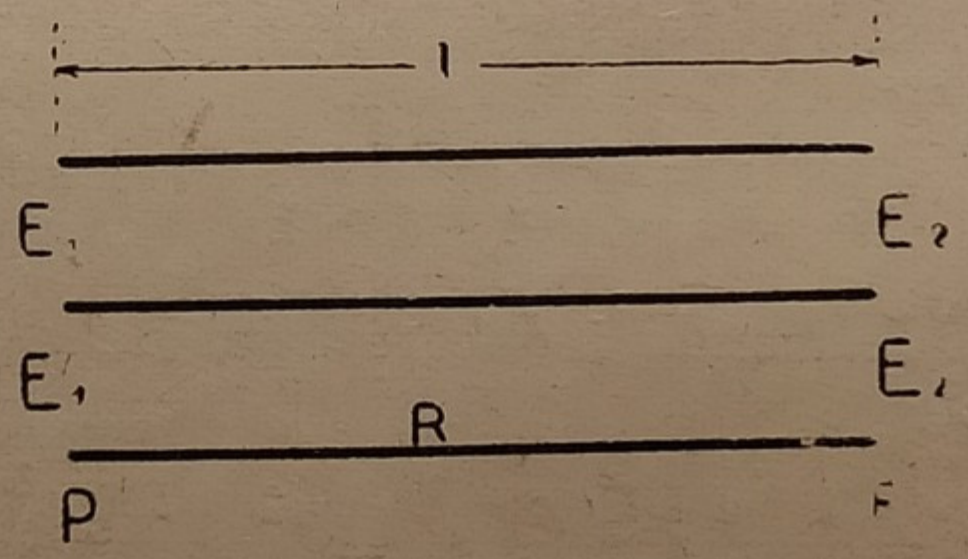


Fig. 377 - Schema di linea trifase.

Si ha:

$$p\ E_1\ I \cos\varphi \sqrt{3} = 3 \frac{\rho\ l}{s} I^2$$

da cui si cava:

$$s = \frac{\sqrt{3}\ \rho\ l\ I}{p\ E_1 \cos\varphi}$$

e sapendo che $W = E_1 \, I \cos \varphi \sqrt{3}$ e moltiplicando sopra e sotto per $E_1 \cos \varphi$:

$$s = \frac{\rho \, l \, W}{p \, E_1^2 \cos \varphi^2}$$

Per trovare la *perdita di tensione* si può applicare il procedimento del caso precedente considerando come tensioni E_1 ed E_2 quelle rispetto al centro neutro; come perdita R I si terrà quella di un sol filo.

La perdita fra i fili del trifase si ha moltiplicando le perdite rispetto al centro neutro per 1,73 (vedi parag. 98).

4.° Caso. *Trasmissione con linea monofase con carico induttivo ed avente una induttanza propria L.* Si fissa la sezione *s* dei fili colla formola del caso 2.°; e si verifica la perdita di tensione col diagramma vettoriale seguente (Fig. 378):

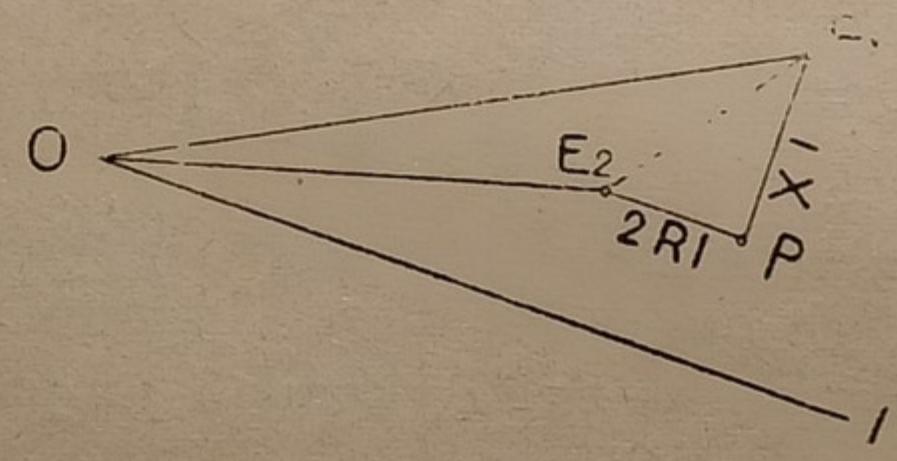


Fig. 378 - Diagramma vettoriale di una linea induttiva.

Si segnano due vettori di OE_2 in tensione d'arrivo e di OI della intensità spostata di φ gradi in ritardo. Da E_2 si conduce una parallela a OI di lunghezza E_2P uguale a 2 RI dove R è la resistenza di un filo.

Da P si eleva una perpendicolare PE_1 che rappresenta il vettore della perdita induttiva di valore:

$$XI = 2 \pi f \, L \, I$$

La retta OE_1 rappresenta in lunghezza e in fase la tensione al principio della linea. Il valore di L si intende riferito ai 2 fili e cioè comprensivo della induttanza del filo di andata e ritorno.

5.° Caso. — *Trasmissione con linea trifase con carico induttivo e avente un'induttanza L propria in ciascun filo.*

Il calcolo della sezione si fa come al 4.° caso. La verifica della perdita di tensione si fa collo stesso diagramma della fig. 378 riferendola al centro neutro e assumendo la reattanza $X = 2 \pi f L l$.

Il coefficiente di selfinduzione L di una linea a due fili si calcola in Henry al chilometro colla formola:

$$L = 2 \left(0{,}5 + 4{,}6 \log \frac{2 D}{d}\right) 10^{-4}$$

dove D è la distanza fra i fili e d = il diametro di un filo, espressi colla stessa unità di misura.

Trattandosi di linea trifase si può applicare lo stesso diagramma vettoriale mettendo per E_1 ed E_2 le tensioni riferite al centro neutro e calcolando il coefficiente L di autoinduzione per ogni chilometro di filo:

$$L = \left(0{,}5 + 4{,}6 \log \frac{2 D}{d}\right) 10^{-4}$$

Il diagramma vettoriale dà risultati approssimativi quando, nel caso di linee molto lunghe ad altissima tensione non si vuol tener conto anche della capacità propria della linea.

199. Regolazione della tensione delle lunghe linee di trasmissione. — Fino ai limiti grossolani di trasporto a 50-70 chilowolt e 200 chilometri la regolazione della tensione d'arrivo delle linee, e che importa di mantenere costante, si fa variando la tensione delle centrali generatrici d'energia. Mano, mano cioè che il carico aumenta si eleva la tensione in partenza per compensare le perdite di linea.

Ma per trasmissioni oltre i limiti indicati le variazioni di tensione dovute ad effetti della induttanza e capacità delle linee sono forti e dipendono dal fattore di potenza del carico. Ecco ad esempio le tensioni in arrivo di una linea a 125 KV costanti in partenza della lunghezza di 240 Km., e con un carico costante di 25 mila chilowatt al variare di cos φ.

Cos φ in ritardo	0.80	—	0.90	—	0.95	—	1.00 —
Tensione in arrivo	92	—	101	—	105	—	112.5 kV
Cos φ in anticipo	1.00	—	0.95	—	0.90	—	0.80 —
Tensione in arrivo	112.5	—	119	—	123	—	126.5 kV

Per correggere queste variazioni vengono installati nelle sottostazioni d'arrivo delle linee, dei grandi motori sincroni funzionanti a vuoto. Come abbiamo visto questi motori possono dare correnti sfasate in anticipo o in ritardo di 90° a seconda che la eccitazione del campo magnetico viene aumentata e diminuita oltre un certo limite medio. Tali correnti sfasate riversate nelle linee all'estremità di arrivo correggono lo sfasamento del carico degli utenti e mantengono una assoluta costanza di tensione. La regolazione del campo si opera con regolatori rapidi automatici.

La regolazione di tensione per linee meno lunghe per servizio di città o di plaghe industriali si può fare anche con trasformatori a rapporto variabile sotto carico e cioè con parecchie prese ausiliarie sul primario o sul secondario.

200. Condutture aeree. — Come conduttori per linee aeree si impiegano: 1. corde e fili di rame elettrolitico semicrudo nudo; 2. corde di alluminio; 3. corde di rame con anima d'acciaio; 4. corde e fili di ferro e acciaio. Ecco le caratteristiche principali:

Tabella conduttori

Resistenza elettrica	Resistenza meccanica	Peso Kg. al Km.
Rame 0,018 ohm	35 — 40 Kg.	8,9 per mm²
Alluminio 0,030 »	20 — 30 »	2,6 »
Ferro 0,12 »	40 — 45 »	7,8 »
Bronzo 0,018-0,038	45 — 76 »	8,7 »

La lunghezza delle campate o tesate per fili da 3,5 — 4 mm. di diametro si fa di 30 a 50 m. con freccie di 30 — 60 cm. Con fili da 5 mm. si possono fare campate da 50-80 m. Per corde e fili superiori a 20 mmq. occorre di fare la calcolazione delle campate e delle freccie da assegnarsi, affinchè gli sforzi nei conduttori, supposti caricati di neve e vento e sotto la contrazione delle basse temperature invernali non abbiano a spezzarsi, con gravissimo pericolo per le persone.

201. Calcolazione delle catenarie. — Per la calcolazione delle campate dei fili si suppone che la *catenaria* tra un appoggio ed un altro abbia forma di una parabola (Fig. 379).

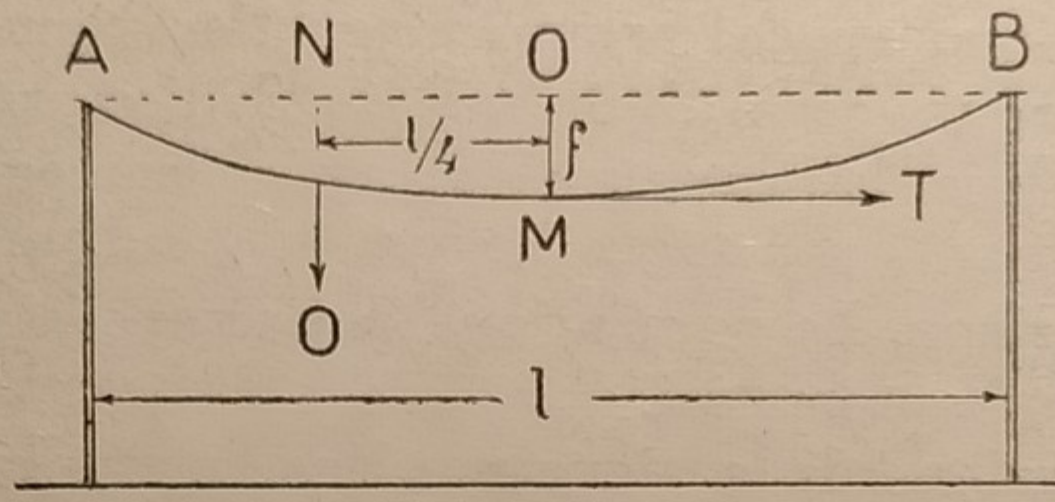


Fig. 379 - Schema di una campata di linea aerea.

Sia A B la campata; l la distanza degli appoggi; f la freccia; T la tensione meccanica orizzontale in Kg. esistente nel filo nella parte più bassa della catenaria; p il peso del filo, al metro lineare.

Si supponga che il filo venga tagliato a metà campata in M sostituendovi la forza orizzontale T e che NQ sia la risultante del peso del filo nel tratto A M ossia $\frac{p\ l}{2}$. Considerando le due coppie formate l'una dalla forza T col braccio OM e l'altra dalla forza NQ col braccio ON, esse si devono fare equilibrio.

Perciò:

$$f\ \mathrm{T} = \frac{l}{4}\ p\ \frac{l}{2}$$

$$f = \frac{p\ l^2}{8\ \mathrm{T}} \text{ da cui } \mathrm{T} = \frac{p\ l^2}{8\ f} \qquad (1)$$

Ossia la freccia da assegnarsi ad una tesata, supposto che sia fissata la tensione meccanica T massima è proporzionale al peso del filo e al quadrato della distanza degli appoggi.

Il valore di p e di T può essere riferito ad un millimetro quadrato di sezione.

La tensione T si fissa in modo che la sollecitazione del conduttore per millimetro quadrato di sezione non abbia ad oltrepassare determinati limiti e che di solito sono fra $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{5}$

del carico di rottura. Così per il filo di rame la sollecitazione per mmq. si tiene da 7 a 10 Kg. per mmq.

Nel calcolare la tensione T e la freccia *f* bisogna tener conto oltre che del peso proprio, anche dei sovraccarichi dovuti al vento o alla neve che si appiccica ai fili nell'inverno, scegliendo fra questi due sovraccarichi quello maggiore.

Le Ferrovie di Stato e le Amministrazioni telegrafiche prescrivono per le calcolazioni dei fili di attraversamento delle ferrovie e dei fili telegrafici e telefonici i seguenti sovraccarichi (1).

1.° Un manicotto di ghiaccio dello spessore di 12 mm. intorno i fili concomitante con un vento orizzontale di 13 Kg. per mq. di sezione meridiana del suddetto manicotto.

2.° Per località ove non è a temersi formazione di ghiaccio un vento orizzontale di 72 Kg. per mq. di sezione meridiana del conduttore. Naturalmente i due sforzi; l'uno verticale del peso e l'altro orizzontale del vento si devono comporre secondo la regola del parallelogramma delle forze.

Inoltre si suppone che questi sovraccarichi siano applicati quando la temperatura è di 20 gradi centigradi sotto zero nel primo caso e 5 centigradi nel 2.° caso. A questa temperatura e coi sovraccarichi sopra accennati la sollecitazione per mmq. non deve sorpassare un quinto del carico di rottura.

Per casi normali si può calcolare un sovraccarico di 0,25 Kg. al ml. per neve e uno sforzo di vento di Kg. 0,06 *d;* dove *d* è il diametro del conduttore in mm.

Ora, poichè il filo viene tesato quando la temperatura è alta e quando non vi è sovraccarico di vento e di ghiaccio, così bisogna, rifare il calcolo della freccia o della tensione meccanica T secondo le reali condizioni di posa e cioè col filo allungato per dilatazione termica da — 20° oppure da — 5° a 15° circa e senza sovraccarico di sorta e tenendo conto altresì della contrazione elastica che subisce il filo essendo eliminati i sovraccarichi. La contrazione elastica è però più piccola che l'allungamento termico.

La lunghezza sviluppata della catenaria è:

$$L = l + \frac{8 f^2}{3 l} \qquad (2)$$

---

(1) Dec. Ministeriale 10 Aprile 1926 N. 2087.

Se t è la differenza di temperatura fra la minima supposta (— 20° oppure — 5° C) e quella di posa, la lunghezza del filo dilatato diventa:

$$L_1 = L\ (1 + \alpha\ t) \qquad (3)$$

dove α = 0,000017 per il rame e 0,000012 per il ferro.

Trovata la lunghezza L_1 si calcola la nuova freccia f_1 mediante la formola (2) supponendo zero il sovraccarico.

Questo procedimento di calcolo semplice non è perfettamente esatto.

Sui manuali speciali si possono trovare formole più complesse ma più esatte.

Agli effetti della resistenza meccanica non si devono impiegare fili di sezione minore di 6 mmq. per linee a bassa tensione e 10 mmq. per l'alta tensione.

L'altezza minima dei fili sul suolo è prescritta di 6 metri. Ma in generale si tiene da 7 a 9 m.

Le distanze fra i fili si tengono in via approssimativa,

fino a	20	mila Volt	da 0,40 a 0,70 al m.
per	30	»	1,10
	40	»	1,40
	60	»	1,80
	80	»	2,20
	100	»	2,70
	150	»	3,50

202. Pali. — I pali di sostegno delle linee sono di legno, ferro, cemento armato. Il legno di castagno assai impiegato per linee modeste di campagna dura in media 10 anni, ma è sottoposto a marcimento specialmente a livello del terreno. Assai più durevoli sono i pali di legno iniettati con sostanze antisettiche quali preservative contro il marcimento. Si adoperano specialmente il solfato di zinco, il solfato di rame, il cloruro di zinco, il cloruro di mercurio, l'olio di creosoto, ricavato dalle acque di lavaggio del gaz. Fra questi sono più impiegati il cloruro di mercurio (Sistema Kjan) e l'olio di *creosoto*.

L'iniezione si fa per immersione a freddo con soluzioni (con il 5 - 7% di sale).

I pali ordinari di legno hanno da 8 a 12 m. di lunghezza e devono avere una grossezza in cima di almeno 10 cm. Essi vengono piantati nel terreno per una lunghezza di 1,30 a 1,80 a seconda della qualità del terreno, dell'altezza del palo e sforzo dei fili. I pali vengono consolidati nel terreno con grossi ciottoli; nei vertici essi sono rinforzati con puntelli e con tiranti.

I pali di ferro si fanno in diversi modi:

1.° *Pali a traliccio* con ferri angolari a sezione ora quadrata ora rettangolare.

2.° *Pali a potrelle* a U abbinate e prolungati con tubi.

3.° *Pali con tubi Mannesmann.* Tutti questi pali vengono piantati nel terreno a mezzo di gettate di calcestruzzo.

I pali a traliccio sono fatti con ferri angolari di 50-60-100 mm. di lato e spessori variabili da 5 a 8 mm.; il lato di base è molto variabile a seconda dell'altezza e dello sforzo. Per pali di 9 a 12 m. la base si tiene di 0,50 a 0.60. Le diagonali si fanno pure con ferri angolari e tenendo una inclinazione da 30 a 45 gradi sull'orizzonte. La calcolazione dei pali semplici di legno o di ferro si fa allorquando si tratta di linee importanti e per gli attraversamenti di ferrovie, tramvie, linee telegrafiche. Alla calcolazione si fa precedere un rilievo planimetrico ed altimetrico del terreno e delle condutture preesistenti.

Sulla base di questi rilievi si traccia la planimetria della linea ed il profilo altimetrico dal quale risultano l'altezza dei sostegni, la loro distanza e le freccie delle catenarie calcolate in base alle formole precedenti.

Non è compito di queste brevi cognizioni sulla esecuzione di impianti di linee di sviluppare il calcolo di stabilità dei sostegni; basterà dare appena un cenno sul procedimento del calcolo, rimandando lo studioso ai trattati speciali sulla resistenza dei materiali. Per calcolare un sostegno bisogna prima fissare gli sforzi massimi che possono agire sul medesimo e che sono; a) la trazione dei fili; b) il vento che agisce trasversalmente alla linea sul palo e sui fili. Ora essendo la determinazione di questi sforzi arbitraria le associazioni tec-

niche e in Italia l'*Associazione Elettrotecnica Italiana* hanno proposto in un serie di norme, determinati sforzi per conciliare la stabilità e la sicurezza dei pali. Secondo l'A. E. I. si deve ammettere come sforzo massimo agente sui sostegni e sui fili quello del vento con 120 Kg. al mq. di superficie piana e 84 Kg. per la sezione meridiana o longitudinale dei conduttori. Inoltre si terrà conto della trazione massima dei fili cogli eventuali sovraccarichi di ghiaccio o neve.

Le ferrovie di Stato e l'Amm. dei Telegrafi esigono per gli attraversamenti delle loro linee che i pali siano calcolati come *ancoraggi* e cioè che abbiano a resistere nella ipotesi che siano recisi tutti i fili esterni alla campata di attraversamento e che sui pali agisca la tensione meccanica massima dei fili in ragione di $\frac{1}{5}$ del carico di rottura; inoltre si suppone che sui pali abbia ad agire *contemporaneamente* un vento colla pressione di 120 Kg. al mq. di superficie piana. Tutte queste regole sono contenute nel Decreto Ministeriale 10 Aprile 1926 N. 2087.

Moltiplicando la forza esercitata dal vento ed eventualmente quella dei fili per i rispettivi bracci di leva rispetto all'incastro dei pali nel basamento di calcestruzzo si ottiene la coppia o *momento flettente* (Mf.). A questo momento deve far equilibrio il *momento resistente* dei ferri dei montanti e che si può calcolare con le formole che si possono trovare sui libri di resistenza dei materiali.

Dalla uguaglianza fra i due momenti si desume la sezione dei ferri oppure la *sollecitazione* dei medesimi (sforzo per mmq. a cui è sottoposto il ferro).

Per i pali a traliccio che abbiano *almeno* un lato di base di 0,50 a 0,60, la sezione di ciascuno dei 4 ferri angolari che formano i montanti in mmq. è data dalla formola:

$$s = \frac{\mathrm{M}f}{r \times d \times 2}$$

dove Mf è il momento flettente delle forze esterne agenti sul palo; r la sollecitazione ammessa per il ferro; d il lato della base in m. misurato nel senso dello sforzo, ossia se la base è quadrata, la distanza fra due montanti.

Come valore di *r* si mette 1/3 del carico di rottura ossia da 10 a 12 Kg. Le ferrovie di Stato prescrivono pure come sollecitazione del ferro sotto i massimi sforzi 12 Kg. per mmq.

ESEMPIO. — Un attraversamento ferroviario è formato con una linea a tre conduttori di rame della sezione minima (prescritta) di 35 mmq. La campata di attraversamento è di 50 m. ed i sostegni sono formati da pali a traliccio alti m. 12 sul blocco di calcestruzzo ed aventi una sezione quadrata di 0,80 × 0,80 al piede e 0,25 × 0,25 in cima. Calcolare la freccia dei fili e la sezione dei montanti al piede.

Peso del conduttore al m. l.	Kg. 0,315
» Manicotto di ghiaccio di 12 mm. di spessore	» 0,680
Totale	Kg. 0,995

Il vento orizzontale con 18 Kg. per mq. di sezione meridiana (diam. del collare di ghiaccio 0,031) porterà uno sforzo di 18 × 0,031 = 0,53 Kg. al ml. Il carico *totale risultante* delle due forze agenti ad angolo retto sarà:

$$\sqrt{0{,}995^2 + 0{,}53^2} = 1{,}13 \text{ Kg. al metro lineare}$$

Carico per mmq.: 1,13 : 35 = 0,0323.
Sollecitazione massima del rame uguale a un quinto del carico di rottura:

$$\frac{1}{5}\ 35 = 7 \text{ Kg.}$$

$$\text{Freccia} = \frac{50^2 \times 0{,}0323}{8 \times 7} = 1{,}43$$

Tensione massima in ciascuno filo	35 × 7 = 245
Tensione nei tre fili	245 × 3 = 735

Per fare il calcolo dei sostegni supponiamo che siano recisi i fili esternamente alla campata, mentre agisce un vento di 120 Kg. sulle membrature di ferro in senso longitudinale. Da un disegno sommario, ammesso che i montanti siano di ferro angolare 60 × 60 e che le diagonali siano di ferro angolare di 35 × 35, risulta una superficie piana battuta dal vento di mq. 1,90 che si porta a 3,2 mq. per tener conto della facciata posteriore che pure è parzialmente battuta dal vento. Lo sforzo del vento sarà:

$$120 \times 3{,}2 = 384 \text{ Kg.}$$

con punto d'applicazione a m. 5 sul piano terra o del calcestruzzo.

Sforzo dei fili Kg. 735 con punto di applicazione a m. 11 sul piano di terra. Il momento flettente sarà:

$$384 \times 5 + 375 \times 11 = 10005 \text{ Kg. m.}$$

La sezione netta dei montanti del traliccio ammessa una sollecitazione massima di 12 Kg. per mmq. risulterebbe secondo la formola succitata:

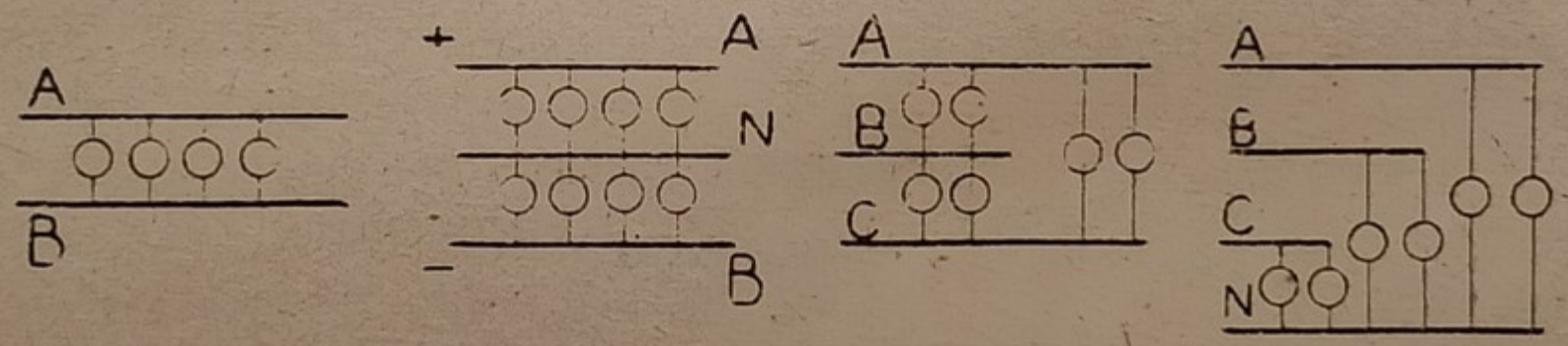
$$s = \frac{10005}{12 \times 0{,}80 \times 2} = 525 \text{ mmq.}$$

Siccome però i chiodi delle diagonali diminuiscono la sezione utile si adotti per sicurezza dei ferri angolari di 60 × 60 × 6 con una sezione di 690 mmq.

Il calcolo semplice che abbiamo presentato è sommario e dovrebbe essere completato con quello delle diagonali, dei chiodi, della fondazione e con altre verifiche che sono più di competenza di Ingegneri che di capitecnici.

203. Reti di distribuzione a bassa tensione. — Le linee a bassa tensione per distribuzioni stradali possono essere:

a) a due fili a c. a. oppure a c. c. (Fig. 380);
b) a tre fili a c. a. oppure a c. c. (Fig. 381);
c) trifasi a tre fili (Fig. 382);
d) trifasi a quattro fili ossia con neutro (Fig. 383).



Figg. 380 - 381 - 382 - 383 - Schemi di linee a due fili, a tre fili, trifase a tre fili, trifase a quattro fili.

Sistema a due fili ed a tre fili. — Le linee a due ed a tre fili si adoperano per scopo specialmente di illuminazione.

Il sistema a tre fili usato tanto per c. c. che per c. a. consiste nel disporre le lampade o le derivazioni per gli utenti in due gruppi in serie. Un gruppo di lampade è inserito fra uno dei fili principali (A) ed il neutro N; il secondo fra il neutro e l'altro filo principale (B). Perciò la corrente è obbligata a passare prima per le lampade del primo gruppo poi per le lampade del secondo gruppo. Il neutro fa da collegamento fra l'uno e l'altro. La tensione risultante fra i due fili principali A e B è il doppio della tensione delle lampade; la

corrente circolante è la metà di quella necessaria per l'alimentazione dei gruppi se questi fossero in derivazione semplice come alla fig. 380. La sezione dei due fili A e B può essere un quarto di quella che sarebbe necessaria se, a parità di perdita di linea, le lampade fossero messe in derivazione semplice su due fili. Il neutro si tiene di solito di sezione uguale o la metà di quella dei fili principali A e B. Il sistema a tre fili richiede quindi un peso molto minore di rame o quanto meno permette collo stesso peso del sistema a due fili di quadruplicare la lunghezza delle linee e di dare alle reti di distribuzione un raggio d'azione molto maggiore. Oltre al sistema a tre fili, si è applicato anche il sistema a quattro fili con due neutri e tensione tripla delle lampade; il sistema a cinque fili con tre neutri, quadruplicando la tensione; ma la complicazione dei fili e l'aumento numeroso degli isolatori ha formato un ostacolo per la diffusione di questi sistemi.

Nel sistema a tre fili affinchè la tensione sui due ponti sia uguale è necessario che il numero delle lampade inserite sui due gruppi sia uguale e cioè che il sistema sia *equilibrato*. Ma nel caso di distribuzione a utenti privati l'accensione delle lampade è arbitraria ed il sistema diventa *squilibrato*, e potrebbe arrecare uno squilibrio nella tensione. Per ovviare a questo inconveniente si mettono dei dispositivi di regolazione della tensione sui due ponti. (Vedi fig. 384). Negli impianti a

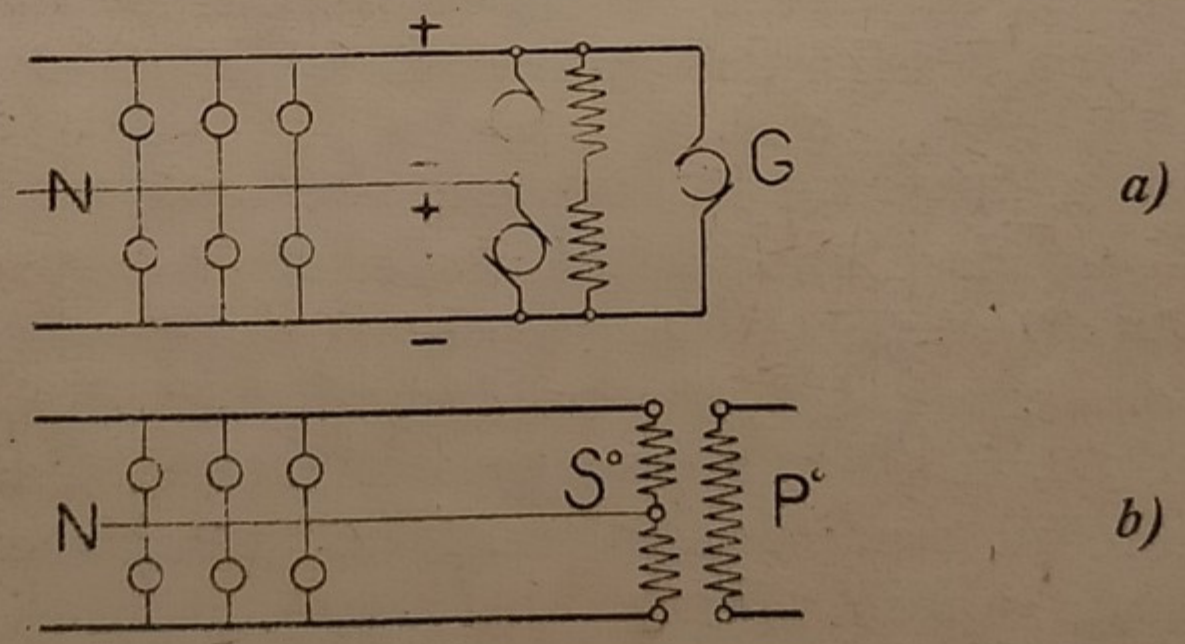


Fig. 384 - Regolazione della tensione nelle distribuzioni a tre fili
***a*) con corrente continua; *b*) con corrente alternata.**

corrente continua si ricorre a dinamo equilibratrici, a batteria di accumulatori; negli impianti a corrente alternata basta attaccare il neutro al centro del secondario del trasformatore od

al centro di avvolgimento dell'alternatore come è chiaramente indicato nella 2.a della fig. 384 b.

Sistemi trifasi. — Le linee di distribuzione trifasi si fanno ora con tre fili di fase e perciò con una tensione fra le fasi uguale a quella delle lampade; ora con quattro fili dei quali tre di fase e uno neutro; in questo caso la tensione di fase è 1,73 la tensione delle lampade. Chiamando 100 la sezione di una linea a due fili e 100 il loro peso, la sezione dei fili di una linea trifase a tre fili (a parità di energia distribuita, di lunghezza di linea e di perdita) è 50 e il peso 75. Se la linea è a quattro fili la sezione diventa 16,66 ed il peso 35. Si ha quindi un grande risparmio di rame adottando il secondo sistema. Anche qui è necessario di allacciare il neutro al centro di stella del trasformatore o dell'alternatore.

204. Distribuzione per le città. — Le linee a bassa tensione percorrendo tutte le strade vengono a formare come una rete a maglie chiuse. L'alimentazione di questa rete si fa in due modi: 1.° Se si impiega la corrente continua di solito la centrale generatrice è posta al centro della rete e da questa si diramano tante linee dirette, dette *feeder* che vanno poi ad attaccarsi ai nodi principali della rete di distribuzione. Di solito sui *feeder* non si fanno derivazioni. La regolazione della tensione si fa in base a dei voltmetri nella centrale che sono collegati, con dei fili detti piloti, ai nodi principali della rete.

2.° Se si impiega la corrente alternata miglior sistema è quello di stendere una rete ad alta tensione aerea o sotterranea e di impiantare ai centri principali delle cabine di trasformatori dai quali si diramano i conduttori di bassa tensione. I trasformatori si installano nei sotterranei delle case, in cabine di ferro o muratura, in veri locali sotterranei nei crocicchi delle strade o delle piazze.

Nel servizio di grandi città a corrente alternata i cavi ad alta tensione sono doppi oppure collegati ad anelli ed a maglie chiuse in modo che i trasformatori possono essere alimentati da diverse direzioni e cioè in modo che mancando la corrente per guasto o riparazione sopra un cavo si possa continuare il servizio per mezzo di un altro cavo. Le cabine dei

trasformatori servono quasi sempre di sezionamento dei cavi alta tensione. Di solito la rete di distribuzione di ciascun trasformatore non è collegata con quella dei vicini trasformatori ma forma una piccola rete a se. Il neutro deve essere messo a terra molto accuratamente per ovviare al pericolo di contatto fra alta e bassa tensione in caso di guasto del trasformatore.

Gli attacchi sia dei feeder che dei cavi ad alta tensione ai nodi delle reti di distribuzione sono fatti con giunti mobili, per poter isolare al bisogno le estremità dei tronchi di linee in caso di riparazione.

205. Isolatori per linee aeree. — Per la fabbricazione degli isolatori si adopera sopratutto la porcellana ed il vetro.

La porcellana è più impiegata per la maggior durezza e solidità; il vetro bianco o verde è ottimo per isolatori di bassa tensione, di forma massiccia e anche per le alte tensioni specialmente su pali molto elevati e fuori del tiro dei sassi. Un terzo materiale che è fabbricato in Italia come gli altri due è il *pirex* che è formato di quarzo fuso ed ha la particolarità di essere molto duro e resistente, di non risentire gli effetti delle brusche variazioni di temperatura.

Si hanno due forme caratteristiche di isolatori: *a perno ed a catena*. I primi sono i più comuni e servono per linee tanto a bassa quanto ad alta tensione fino a 60-70 chilowolt, ma oltre questa tensione le loro dimensioni — altezza e diametro di campana — ed il loro peso li rende poco maneggevoli e fragili, il che offre un ostacolo forte all'impianto di trasmissioni con maggiori tensioni. A superare l'ostacolo si costruirono gli isolatori a catena od a sospensione formati da isolatori a campana di 20-25 cent. di diametro colla testa fissata in un cappuccio di acciaio e un perno nella cavità interna con gancio, per modo da poter agganciare un isolatore con l'altro a formare una catena. Le catene vengono agganciate ai bracci sporgenti dai pali ed i conduttori sostenuti in basso dall'isolatore inferiore della catena. Ogni isolatore può resistere in media a 50 mila Volt a secco e 35-40 mila sotto pioggia; però è da osservare che messi in catena per tensioni di linea di oltre 100 mila volt, la tensione non si suddivide uniformemente per effetto di capacità. Gli isolatori di estremità

sono sottoposti a una maggior differenza di potenziale di quelli nel mezzo della catena. Naturalmente le linee armate con isolatori a sospensione esigono pali molto più alti e robusti e dato il loro costo servono soltanto per trasmissioni di molte migliaia di chilowatt.

Gli isolatori a perno per tensioni superiori ai 10 o 15 mila Volt si costruiscono in due pezzi (talvolta in tre pezzi) e cioè di una campana alta e stretta in cui si infigge il perno di sostegno e di una campana grande semplice o doppia sovrapposta alla prima. Questi isolatori offrono garanzia maggiore di isolamento. I pezzi vengono uniti per mezzo di cemento Portland; però attualmente predomina la tendenza a sostituire al cemento di fissaggio degli isolatori dei mastici elastici o dei dispositivi elastici per permettere la libera dilatazione al variare della temperatura. Tale dilatazione ove fosse ostacolata può ingenerare degli sforzi notevoli e provocare la spaccatura delle campane.

La scelta degli isolatori per una linea è subordinata: 1.° ad ottenere un perfetto isolamento sotto la tensione fissata anche in caso di pioggie forti con un margine di sicurezza del doppio o del triplo della detta tensione prima che abbiano a formarsi degli effluvi e delle scintille di scarica; 2.° a soddisfare alle esigenze meccaniche di trazione dei conduttori in relazione alla lunghezza massima delle campate ed al peso di conduttori. Perciò anche se per una determinata tensione può bastare un tipo di isolatore si esige talvolta per tesate grandi, attraversamenti di ferrovie e strade, di dover scegliere isolatori molto più pesanti e robusti per ragioni meccaniche di sicurezza.

Tutti gli isolatori per alte tensioni, oltre 10 mila volt circa, vengono provati nelle fabbriche di costruzione sottoponendoli ad una tensione dal doppio al triplo applicata fra il collo dell'isolatore ed un perno provvisorio, sia *a secco, sia sotto pioggia artificiale*. L'A. E. I. ha pubblicato a questo riguardo alcune norme di collaudo degli isolatori di cui daremo un sunto per regola dei tecnici.

1.° Le tensioni di prova raccomandate sono:

Tensione di esercizio	Tensione critica di prova	
	a secco	sotto pioggia
1500	18000	12000
3000	27500	18500
6000	42500	28500
10000	59500	39000
15000	73000	50000
20000	90000	60000
30000	118000	79000
45000	150000	100000
60000	180000	120000
80000	240000	160000
100000	300000	200000

2.° Le prove si faranno elevando a poco a poco la tensione finchè si determini la prima scarica superficiale; nelle prove sotto pioggia si spruzzerà l'isolatore sotto un angolo di 45° e con una precipitazione di 5 mm. al minuto. Il coefficiente di sicurezza sotto pioggia è di regola 2/3 di quello a secco. Durante le prove nessun oggetto deve trovarsi a una distanza minore di 2 m.

3.° Sopra un piccolo numero di pezzi di una partita di isolatori (dal 2 al 3 per mille) in caso di collaudo, si possono eseguire *prove di perforazione sott'olio* per determinare la resistenza della porcellana ad essere perforata. Detta prova si fa sopra l'isolatore completamente immerso nell'olio provvedendo ad applicare un'armatura metallica interna ed alla testa. La tensione di perforazione fra le due armature non dovrà essere minore di 1,5 la tensione critica di prova dell'isolatore a secco.

4.° Le alte tensioni necessarie ottenute dai trasformatori devono potersi regolare a mezzo reostati sul circuito primario di bassa tensione e saranno misurate sia con voltmetro sulla bassa tensione, sia con spinterometri a sfere adatti. (Vedi tabella n. 3). Perciò sarà bene consultare le regole dettagliate per l'uso degli spinterometri a sfere contenute nelle norme della A. E. I.

5.° A richiesta potranno farsi nel caso di collaudo di im-

portanti ordinazioni, delle prove meccaniche sollecitando per 10 minuti un isolatore allo sforzo massimo per cui è costruito e ordinato. Poi si eleverà lo sforzo fino alla rottura; il coefficiente di sicurezza dovrà essere almeno di quattro.

Per gli isolatori a perno la trazione sarà fatta sul collo e per gli isolatori a catena si applicherà lo sforzo fra la cappa ed il perno centrale.

6.° La porcellana deve essere compatta, omogenea ed un pezzo spaccato non deve assorbire nessuna traccia di liquido colorato (soluzione alcoolica di fuxina). La traccia di colorazione deve scomparire sotto lavatura d'acqua semplice.

Per le richieste di isolatori si indicherà il tipo di isolatore, la tensione d'esercizio, ed eventualmente lo sforzo massimo meccanico, la località in cui si svolgerà la linea, il numero dei pezzi ecc. Per il collaudo e ricevimento riferirsi alle norme dell'A. E. I.

206. Norme di sicurezza per l'impianto delle linee aeree. — Gli scopi che devono guidare gli installatori di linee di trasmissione di energia sono:

a) di ottenere la massima sicurezza contro i pericoli di danni alle persone e alle proprietà che potrebbero arrecare la caduta dei fili o degli appoggi; *b*) di ottenere la massima sicurezza per la continuità del servizio. Perciò le prime cure sono quelle di fare un tracciato il meno tortuoso possibile, di scegliere grossezze di fili e distanze convenienti in modo che sotto l'azione dei massimi sforzi prevedibili di vento o neve la sollecitazione dei fili e materiali non siano superiori a un terzo o metà del carico di rottura. Così pure i pali di sostegno dei fili, gli isolatori e relativi ferri di sostegno devono essere scelti in rapporto agli sforzi massimi ai quali sono chiamati.

In Italia la legge principale che regola la materia è la Legge 7 Giugno 1894 N. 232 e Regolamento R. D. 25 Ottobre 1895 N. 642.

1.° L'Associazione Elettrotecnica Italiana ha fissato come norma prudenziale che il calcolo dei conduttori e dei sostegni sia fissato in base alla pressione di un vento di 120 Kg. per metro quadrato di superficie piana e circa 85 Kg. per metro

quadrato di meridiana pei conduttori e pali tondi. La sezione minima dei conduttori di rame è stabilita di 10 mmq. per quelli ad alta tensione e 6 mmq. per quelli di bassa tensione.

2.° L'altezza minima sul suolo dei conduttori si tiene di 7 m. in aperta campagna; di 7 a 9 per i passaggi sulle strade. I conduttori devono essere resi inaccessibili dal suolo, dai tetti delle case, dalle finestre e balconi e l'inacessibilità si intende raggiunta quando non si possa toccare i fili senza superare ostacoli, (fili spinosi, corone di punte sui pali) e non senza munirsi di mezzi speciali, (scale, pertiche).

3.° Per le linee esterne specie se ad alta tensione i conduttori devono essere senza copertura isolante; le giunzioni devono farsi: Con saldatura a stagno o con morsetti appropriati. Di questi morsetti per giunzioni semplici e per derivazioni se ne trova una larga varietà in commercio.

4.° Ad ogni sostegno per le linee ad alta tensione è obbligo di applicare un cartello premonitore del pericolo di contatto. Se i sostegni sono di ferro essi saranno messi a terra accuratamente.

5.° Nella palificazione in legno è necessario di mettere nei vertici del tracciato dei contropali e dei tiranti di rinforzo. I tiranti in ferro delle linee ad alta tensione devono essere messi a terra oppure interrotti in alto da opportuni isolatori; gli isolatori di vertice saranno muniti di parafili per lo scopo di impedire lo sbandamento in caso di rottura.

6.° Si deve evitare di passare con linee ad alta tensione sopra i tetti delle case e cortili, alberi fruttiferi, ecc. In caso di bisogno si farà una protezione contro il pericolo di caduta mettendo il doppio isolatore per ogni filo e avvolgendo i conduttori con un'ampia rete metallica a culla che sarà elettricamente messa a terra oppure isolata dai sostegni.

In generale le linee devono essere tenute libere dalle piante.

7.° Si cercherà di evitare fin dove possibile di mettere sugli stessi pali condutture ad alta tensione e condutture a

bassa, ma ove vi fosse necessità assoluta di mettere dette condutture esse saranno separate da una rete metallica messa elettricamente in comunicazione colla terra.

8.° Se sulla stessa linea ad alta tensione devono essere appoggiati fili telefonici o di segnalazione questi ultimi saranno installati inferiormente; inoltre saranno considerate agli effetti del grave danno e pericolo di contatto colle persone, come fili ad alta tensione. Gli apparecchi ricevitori (telefoni, campanelli, ecc.) saranno protetti contro il pericolo del contatto colle persone con adatti dispositivi, che si trovano in commercio; davanti agli apparecchi si metterà un piano o sgabello isolante per le persone.

9.° Tutte le linee alla loro origine dove si immette la corrente sia ad alta tensione che a bassa tensione devono essere muniti di interruttori automatici, ed a mano, valvole, ecc. in modo da poter staccare in ogni caso la corrente. Nelle lunghe linee ad alta tensione si usa di intromettere delle cabine di *sezionamento* delle linee stesse e alle derivazioni importanti ad alta tensione delle cabine di *smistamento*, tutte munite di separatori a coltello, interruttori automatici, ed a mano, valvole. E' obbligo altresì sulle linee ad alta tensione di installare nelle officine generatrici cabine di sezionamento, di trasformazione, ecc. degli interruttori a coltello per la *messa a terra* dei conduttori in caso di lavori di riparazione.

10.° Per gli attraversamenti di strade ferrate e fili telegrafici o telefonici saranno osservate le regole esposte dal Decreto Ministeriale 10 Aprile 1926 N. 2087.

Per gli attraversamenti di strade comuni si useranno le maggiori cautele per assicurare l'incolumità dei passanti scegliendo pali robusti, armature di ferro; sostituendo ai fili delle cordicelle di fili di rame con sezioni non minori di 25 mmq.; facendo corte le campate e tenendo alti i fili sul suolo mettendo il doppio isolatore e le losanghe ed eventualmente reticelle di filo ferro.

207. Cavi sotterranei. — I cavi sotterranei per energia si distinguono in cavi cordati e cavi concentrici. I cavi

cordati sono formati da fili o corde di rame avviluppati da isolanti e poi attorcigliati a lungo passo. Talvolta per basse e medie tensioni i conduttori sono formati da corde di sezione in forma di settore. Nei cavi concentrici i conduttori invece sono disposti a strati concentrici separati da isolanti. Sono poco impiegati e solo per basse tensioni e grandi intensità. (Fig. 385).

Fig. 385 - Sezioni di cavi concentrici, a settore, cordati tondi.

I cavi cordati e quelli unipolari sono impiegati per alte e medie tensioni. Come isolanti dei cavi si adoperano specialmente:

1.° nastri di carta imbevuti di miscele fluide o vischiose a base di oli minerali; 2.° gomma vulcanizzata o caucciù; 3.° filaccie di juta catramata, nastri tessili. Questi ultimi isolanti si adoperano più per riempitivi e protezione.

Tutti i conduttori isolati cordati o concentrici ricevono esternamente una protezione di tubo di piombo che viene applicata, anzi iniettata a freddo con grandi presse. Tale tubo serve a proteggere i conduttori contro ogni infiltrazione di umidità.

In fine quasi tutti i cavi che devono essere interrati vengono protetti contro azioni meccaniche da un'armatura formata da due nastri di ferro attorcigliati sul tubo di piombo ed infine da un'ultimo strato di corda catramata per proteggere i nastri di ferro dalla ossidazione.

L'isolante di carta imbevuta di isolante vischioso, che è il più impiegato, può sopportare un gradiente di potenziale di 40 a 50 chilowolt (KV) al mm. La gomma vulcanizzata può sopportare un gradiente di 18 a 20 chilovolt.

Per i tecnici installatori di cavi è importante di sapere

che il gradiente di potenziale nello strato isolante di un conduttore non è uniforme per tutto lo spessore ma si distribuisce secondo una variazione logaritmica. Questo gradiente rappresenta la sollecitazione o sforzo che subisce l'isolante verso la disgregazione. Praticamente l'isolante si calcola per 4 volte il gradiente massimo di esercizio.

Per esempio: se il conduttore è cilindrico e il cavo unipolare, indicando con r il raggio di sezione del conduttore; R il raggio interno del tubo di piombo; ρ un raggio di uno strato isolante intermedio fra r e R e V la tensione applicata fra conduttore e piombo, il gradiente (Volt per mm.) al raggio ρ è espresso:

$$G = \frac{0{,}434\ V}{\rho \log \frac{R}{r}}$$

Da questa formola si cava che se ρ diventa piccolo, G aumenta rapidamente. Da ciò la regola di non adoperare conduttori di sezione minore di 10 mmq. per cavi alta tensione.

Un'altra osservazione importante è che i cavi sono sottoposti ad un riscaldamento dovuto a due cause:

1.° al calore sviluppato per effetto Joule dal conduttore.
2.° al calore per isteresi dell'isolante, somigliante a quello che si sviluppa nel ferro. Il primo è proporzionale al quadrato dell'intensità; il secondo al quadrato della tensione e dipende anche dalla temperatura dell'isolante stesso. Per gli isolanti di carta e di caucciù è necessario non sorpassare i 50° C.; oltre questo limite gli isolanti si deteriorano rapidamente perchè le perdite per isteresi dielettrica aumenta rapidissimamente.

La densità di corrente nei conduttori dei cavi è fissata da norme della Associazione Elettrotecnica Italiana e può riassumersi in queste cifre:

Per conduttori da	1	a	5	mmq.	9	Amp. per mmq.
»	5	»	10	»	8	» »
»	10	»	25	»	6	» »
»	25	»	50	»	4,5	» »
»	50	»	150	»	3,5	» »
»	150	»	400	»	2	» »

Queste densità valgono per cavi bipolari fino a 3000 V.

Per cavi trifasi occorre ridurre del 10% le dette densità.

Se i cavi sono per 3000 a 10000 V. si devono ridurre del 15%.

Se i cavi infine sono disposti in fasci si devono ridurre le densità indicate del 25%. Se più cavi alta tensione sono disposti nello stesso cavo si tiene fra l'uno e l'altro 20-30 cm.

208. Prove dei cavi e posa. — Le prove di collaudo dei cavi si fanno nella fabbrica prima della spedizione e consistono:

1.° Prova di tensione con 2 a 2,5 volte la tensione di regime ovverossia con tensione corrispondente da 2,3 a 4 chilovolt per mm. di spessore d'isolante (carta).

2.° Prova di rigidità. Questa prova si eseguisce sopra uno o più spezzoni di cavo applicando una tensione fino alla perforazione.

3.° Prova di consumo d'energia. Nelle importanti ordinazioni si fa la prova di consumo di energia a 800 V. e a 4000 V. mediante wattmetro e notando la variazione del fattore di potenza della corrente consumata dal cavo, a circuito aperto.

Posa dei cavi. — La posa dei cavi sotterranei si fa con due sistemi:

1.° *A cavo fisso* cioè posato in una trincea profonda da 80 cm. a 1 m. proteggendolo con una cassettina di legno ripiena di sabbia e di asfalto; talvolta si protegge con tegole di laterizi, con tubi di cemento, ecc. a difesa di colpi di piccone. I cavi con questo sistema devono avere la protezione con nastri di ferro o fasciatura di fili di ferro. 2.° *A cavo amovibile* in questo sistema i cavi vengono tirati dentro a delle canalizzazioni rettilinee predisposte nello scavo e formate da tubi o cunicoli cellulari di cemento o di laterizi. I tronchi rettilinei si riuniscono all'incrocio delle strade in pozzetti di muratura nel quale si operano le giunzioni e le derivazioni. Il sistema si applica per le strade cittadine di grande movimento. I cavi possono con questo sistema essere sprovvisti della protezione di ferro.

209. Regole di sicurezza per la posa dei cavi. — I cavi senza protezione di ferro devono sempre essere protetti in tubi, cunicoli di ferro, di cemento; le giunzioni si devono fare con cassette apposite di ghisa, smontabili munite di speciale morsetteria per la giunzione dei conduttori e riempite di miscela isolante colata fluida (paraffina). Le cassette di giunzione, le armature o tubi metallici di protezione dei cavi devono essere *messe a terra.* Nella installazione di cavi si deve prevenire il pericolo che possa penetrare umidità dalle testate. Tutti i detti accessori possono essere forniti dai fabbricanti di cavi.

Nell'incrocio con altre condutture di altro genere (telefoniche, gaz, ecc.) si interporrà fra le due condutture dei mattoni, in modo da impedire ogni contatto diretto. Trattandosi di trasmettere corrente alternata a bassa tensione od a media tensione non si devono adoperare cavi unipolari ma bipolari e tripolari, e ciò per evitare fenomeni di selfinduzione e perdite per correnti di Foucault creati dal campo magnetico intorno ai conduttori.

CAPITOLO XV.

Illuminazione elettrica.
Impianti di motori – Tariffìcazione.

210. Impianti di illuminazione elettrica. — Le lampade ad incandescenza a filamento metallico di tungsteno sono di due sorta: *monowatt* e *mezzowatt* intendendosi che il consumo di energia per candela sia di circa un Watt per le prime e mezzo Watt per le seconde. Il consumo reale non corrisponde a questo dicitura.

Le monowatt si costruiscono normalmente da 5-10-16-25-32-50 candele e consumano circa 1,2 watt per candela; le mezzowatt da 50 a 2000 candele, ma fino a 100 candele consumano un Watt per candela. Nelle prime il filamento lungo da 500 a 1000 cm. è disposto a zig-zag e nell'ampolla vi è il vuoto. Nelle seconde l'ampolla è piena di un gaz inerte (azoto, argon) ed il filamento avvolto in una stretta spirale, è portato ad una temperatura superiore a quella delle monowatt di modo che la luce è molto più bianca.

Consumo delle lampade monowatt per candela

Candele	110 V.	150 V.	220 V.
5	1,35	1,45	—
10	1,25	1,35	1,40
16	1,05	1,15	1,25
25	1	1,10	1,20
32	1	1,05	1,15
50	1	1,05	1,15

Consumo delle lampade a gas inerte per candela.

Candele	110 V.	150 V.	220 V.
25	1,40	—	—
60	1,10	1,20	1,33
100	0,83	0,96	1,15
200	0,73	0,76	0,80
300	0,67	0,70	0,75
500	0,63	0,65	0,67
1000	0,61	0,62	0,64
1500	0,58	0,60	0,63
2000	0,55	0,57	0,59

La durata delle lampade varia da 1000 a 2000 ore: gli eccessi di tensione fanno diminuire rapidamente la vita mentre alimentate con tensione bassa la durata loro si prolunga di molto. Così ad esempio una tensione del 10% in più di quello di regime riduce la durata a un quarto; invece una diminuzione del 10% l'allunga di 4 volte.

211. Unità fotometriche. — 1.° La unità di misura dell'intensità luminosa (*splendore*) è la *candela internazionale o decimale* pari a un decimo dell'unità Violle adottata nella Conferenza Internazionale di Parigi nel 1884 e definita come luce di un centimetro quadrato di superficie di platino fuso, al momento della solidificazione. Ma essendo difficile riprodurre questa unità così nella pratica si sono adottate altre luci di paragone assai più comode e fra esse la candela Hefner che è una lampada a stoppino all'amilaceto costruita secondo determinati dettagli e che equivale a 0,885 candele decimali.

2.° Si dice *lumen* il flusso luminoso emanato da una sorgente luminosa puntiforme di una candela decimale che intercetta un metro quadrato di superficie sferica col raggio di un metro ed avente al centro la sorgente luminosa. Con questa unità si possono misurare e confrontare le altre sorgenti luminose e esprimere la potenza luminosa. La misura si fa mediante dei fotometri sferici. Se I è l'intensità luminosa e se i raggi si diffondono ugualmente in tutte le direzioni, dalla sorgente emaneranno 4π I lumen (la superficie di una sfera

di 1 metro di raggio è: 4 π) Ma ordinariamente le lampadine non diffondono i raggi ugualmente; perciò invece di dare $3{,}14 \times 4 = 12{,}56$ I lumen le lampadine danno da 10 a 11 lumen per candela.

3.° Per misurare la *chiarezza* o illuminazione di una superficie si adopera come unità il *lux* che è quella data da una candela sopra una superficie bianca ad un metro di distanza essendo la superficie perpendicolare al raggio. Per avere una idea di questa unità si ricorda che con un lux si legge difficilmente; si legge appena con 10 lux; si possono far lavori fini con 40-60 lux; si ha una forte illuminazione con 100 lux.

Ecco alcuni dati più particolari:

5-10 lux pei locali di passaggio e in cui non si fanno lavori;

10-30 lux per ambienti in cui si fanno lavori grossolani come fonderie, segherie, magazzini industriali, stanze d'abitazione comuni, locali per scrivere e leggere.

30-60 lux per locali in cui si fanno lavori ordinari, officine meccaniche, sale di scrittura e di lettura, aule scolastiche, ristoranti, sale di riunione, negozi, stamperie, tessiture e filature.

60-100 lux per locali in cui si fanno lavori fini, come sale di disegno, litografie, sale d'operazione per ospedali, sale da ballo o di riunione, negozi importanti.

Oltre 100 lux si ha un'illuminazione più che abbondante e che diventa sfarzosa da 200 lux a 300 lux.

Dovendosi calcolare ora il numero di candele C per un ambiente occorre tener conto del potere assorbente o riflessivo delle pareti. Chiamando L i lux per metro quadrato di superficie che si vogliono ottenere; K il rendimento luminoso delle pareti, il numero delle candele necessarie per mq. è dato dalla formola:

$$C = \frac{8\ L}{K}$$

in cui K ha i seguenti valori:

Pareti chiare con illum. diretta	50 -	ill. indiretta	35
» semichiare	40 -	»	20
» scure	30 -	»	5

Se il soffitto è chiaro e le pareti scure si farà una media tenendo conto delle superfici. Il numero complessivo delle candele si ottiene moltiplicando C per la superficie piana del locale. *Il numero delle lampade si calcola tenendo conto che la distanza orizzontale fra le medesime deve essere circa* 1,5 *volte l'altezza sul piano di lavoro e circa* 0,75 *quella dalle pareti.*

Per ottenere un buon rendimento luminoso è uso generale di munire le lampade di una armatura con riflettore bianco e globo diffusore di vetro opalino. Lo studio di una buona illuminazione deve essere rivolto non solo ad ottenedere una sufficente chiarezza ma altresì ad vitare le ombre, i riflessi abbaglianti e l'abbagliamento. L'abbagliamento fa restringere la pupilla riducendo la visibilità e fa stancare l'occhio; perciò è necessario sottrarre le sorgenti luminose molto vive, come sono le lampade intensive, mezzowatt, alla visione diretta, avvolgendole in globi opalini, tenendole alte e fuori dalla ordinaria direzione degli occhi.

212. Inserzione delle lampade. - Installazione e isolamento dei fili. — *Le lampade di un impianto si inseriscono di solito in derivazione sopra una linea principale*: tale linea può essere a due fili, a tre fili, trifase a secondo della vastità dell'impianto. La sezione dei fili si calcola in base a 2-3 Amp. per mmq. ma per impianti ragguardevoli occorre fare la calcolazione nei modi già indicati, assegnando una perdita non maggiore del 2 o del 3 per cento.

Per le linee interne agli abitati non si adoperano fili nudi, ma diverse qualità di fili che si distinguono per il genere di copertura isolante. Tale copertura può essere di due o tre strati di filo di cotone avvolte a spirale od a treccia ed imbevute di vernice oppure con strato più o meno sottile di caucciù puro o vulcanizzato e copertura tessile a treccia esterna. Nei luoghi umidi si adoperano fili di medio ed alto isolamento (con gomma vulcanizzata). Nei luoghi secchi bastano i fili con copertura tessile.

La posa o montaggio dei fili per impianti interni a bassa tensione si fa con parecchi sistemi:

1.° *Con isolatori a carrucola e fissafili di porcellana*: Questo sistema è il più impiegato per sostenere ed isolare i

fili nell'interno degli abitati e delle fabbriche; la grossezza e distanza degli isolatori dipende dalla grossezza dei fili. Lungo le pareti le distanze fra isolatori si tengono di I m. e fra filo e filo si lasciano 4 a 5 cm. Gli isolatori si fissano con viti su dei tasselli di legno incastrati nel muro o sopra mensoline di ferro adatte. La cura massima che deve guidare l'elettricista è che l'isolamento e la stabilità dei fili siano perfette e che sia soddisfatta l'estetica.

2.° *Con liste di legno scanalate.* — Il sistema consiste nel mettere i fili in listelli di legno con scanalature larghe 3 a 5 centimetri e rinserrandoli mediante un coperchio di legno sottile liscio o sagomato. Il sistema è poco usato e poco consigliabile perchè se i muri contro i quali si fissano i listelli non è asciutto perfettamente, accade che il legno si imbeve di umidità, i fili pure diventano umidi e si provocano corti circuiti. Perciò le liste scanalate non si possono impiegare se non per casi speciali su pareti secche, tenendole distaccate dalle medesime e verniciando il fondo.

3.° *Coi tubi isolanti.* — E' un sistema ottimo per impianti di illuminazione e forza motrice perchè isola e protegge i fili contemporaneamente. Di solito i tubi isolanti (o Bergmann) sono formati da carta avvolta con vernice a base di catrame e con involucro esterno di lamierino di ferro piombato o di ottone. Con tenaglie speciali si possono curvare per fare i risvolti. Negli impianti con tubi è prescritto di installarli in modo che si possa mettere o togliere i fili quando si vuole; perciò devono avere una larghezza sufficiente perchè i fili si possano tirare comodamente. Trattandosi di condutture a corrente alternata nei tubi si metteranno i fili di andata e ritorno.

Le unioni dei tubi si fanno con speciali raccordi; vi sono pure in commercio scatole metalliche apposite con morsettiere e coperchio nelle quali si fanno le derivazioni.

Per ragioni di estetica spesso si usa di immurare i tubi isolanti nell'intonaco dei muri e dei soffitti. In tal caso è indispensabile che pure gli interruttori e le scatole di derivazione siano incastrate nel muro e che si possa in ogni tempo cambiare i fili in caso di bisogno. I fili devono avere oltre la

copertura tessile anche il rivestimento di gomma pura o vulcanizzata e *per nessun motivo si devono rinserrare giunture di fili nei tubi.*

Altre regole di montaggio e sicurezza sono esposte nelle norme della Associazione Elettrotecnica Italiana che sono riportate più avanti.

Prima di eseguire un impianto è bene che l'elettricista prepari lo schema del medesimo segnando la posizione delle condutture della presa, dei misuratori, degli interruttori, delle prese di corrente, delle lampade, in modo da poter redigere la lista di materiali occorrenti e far sì che il lavoro abbia a svolgersi con precisione, con collecitudine e senza perditempi.

Ultimato l'impianto prima di immettere corrente si proverà l'isolamento mediante un galvanoscopio portatile od un ohmmetro.

213. Norme di sicurezza della A. E. I. per gli impianti interni. — 1.° La presa degli impianti di forza motrice e di illuminazione deve essere munita di un quadro di distribuzione, in locale incombustibile e portante gli interruttori e strumenti totalizzatori della corrente e gli interruttori per le linee partenti. Si fa eccezione per gli impianti di abitazione comuni.

2.° Non si devono fare impianti ad alta tensione nei locali di abitazione, sale di riunione, negozi, magazzini di materie combustibili, stalle, scuderie, locali bagnati od umidi; non si devono fare impianti superiori a 1200 V nei locali industriali umidi, dove si svolgono polveri, vapori acidi od infiammabili. In ogni caso (ove non si tratti di officina o cabina elettrica) i conduttori devono essere rivestiti o protetti contro ogni contatto di persone.

Ove le persone possono trovarsi in condizione di deficente isolamento verso terra (nei bagni, locali di lavorazioni umide, corrosive, acide) tutte le condutture elettriche devono essere sottratte ad ogni eventuale contatto, a meno che non siano protette da tubi metallici messi in buona comunicazione colla terra.

3.° I conduttori nudi ad alta e bassa tensione sono di regola proibiti, salvo che per servizio di gru e tramvie e nelle officine elettriche.

4.° Le distanze minime dei conduttori rivestiti di isolante per linee interne dalle pareti possono ridursi a 2 cm. per bassa tensione salvo che nei locali umidi dove la distanza deve essere portata a 5 cm.

5.° Le sezioni minime dei conduttori per linee sono:

mmq. 3 per conduttori nudi su isolatori.

mmq. 5,50 per fili di rame rivestito per uso di lampadari e simili.

mmq. 0,65 per fili rivestiti ma collocati in tubi isolanti o su isolatori a distanza minima di 1,00 m.

mmq. 3 per fili rivestiti collocati su isolatori a più di un m. di distanza.

6.° La densità di corrente tollerabile nei fili è data dalla tabella 8 (Paragrafo 34).

7.° I conduttori non devono essere sottoposti a sforzi di trazione oltre quelli derivati dal proprio peso. Ove vi sia il pericolo di danneggiamento saranno chiusi in tubi isolanti.

8.° I conduttori multipli non si devono impiegare all'esterno nè per bassa nè per alta tensione. Sono tollerabili solo nei locali asciutti non contenenti polveri o gaz infiammabili, purchè montati su isolatori o racchiusi in canne isolanti. Nei locali umidi si devono adoperare solo cordoncini ad alto isolamento (caucciù vulcanizzato).

9.° Nell'incrocio dei conduttori si metteranno isolamenti supplementari.

10.° Non si devono adoperare arpioncini metallici per fissare i conduttori isolati, salvo che per fili che vanno a terra.

11.° I supporti isolanti devono essere di materiale incombustibile e anti-igroscopico (porcellana, vetro).

12.° I tubi protettori devono essere lisci internamente, non alterarsi all'aria umida; se di carta devono portare un rivestimento metallico ed usarsi in locali asciutti. Devono avere diametro di curvature in modo che si possono estrarre ed introdurre i fili. Devono essere collocati in modo da prevenire infiltrazioni e accumulamento di acqua. Nei tubi non vi devono essere giunzioni di fili.

13.° Sono tollerabili i listelli di legno a scanalature solo in locali ben secchi, per basse tensioni, con fili fortemente isolati (caucciù); non essere tinteggiati o verniciati nè tapezzati dopo

la loro messa in opera. E' buona norma verniciarli prima, almeno a tergo.

14.° Si prenderanno cure speciali per gli attraversamenti dei muri in modo da assicurare l'isolamento, ed evitare il contatto colle persone e la penetrazione di umidità.

15.° Non si debbono adoperare lampadine a più di 300 V. Nei locali pericolosi per incendio le lampadine devono essere munite di dispositivi atti ad impedire il contatto con le materie combustibili. Nei locali bagnati le lampadine saranno racchiuse in armature con globi insieme al portalampada. I portalampada a chiave non si devono impiegare in luoghi umidi; in generale è da sconsigliarsi il loro uso.

16.° Le parti sotto tensione dei portalampada devono essere di materiale incombustibile, essere protette da involucro isolante o da custodia metallica, essere sottratte ad ogni contatto accidentale.

17.° Si deve evitare di mettere i portalampade sugli apparecchi o lampadari a gaz esistenti; in caso contrario si provvederà ad isolamenti suppletori dei portalampada e dei fili.

18.° Per l'equipaggiamento di lampadari e supporti di lampadine si devono impiegare solo cordoncini. Nel montare dei conduttori si deve evitare l'appoggio o strisciamento contro spigoli acuti; nei casi di sospensioni semplici od a saliscendi i portalampade saranno muniti di anelli, ganci e dispositivi qualsiasi per sostenere lo sforzo di trazione e scaricare le viti dei morsetti.

19.° Le prese di corrente a muro devono farsi solo con spine mobili da attaccarsi ai conduttori mobili, devono essere di materiale incombustibile; devono avere sedi robuste, calcolate per corrente maggiore.

20.° Le prese a spina non si devono fare: per alte tensioni, per locali bagnati, per locali con polveri o gaz esplosivi.

21.° Nel caso di prese a spina in locali bagnati, in camere metalliche e in generale per uso industriale si adotteranno le seguenti norme:

a) le parti sotto tensione saranno sottratte ad ogni contatto casuale e la parte esterna del portalampade sarà di isolante.

b) la manopola sarà isolante; l'entrata dei fili nella

manopola porterà una protezione supplementare onde evitare guasti e contatti.

c) I cordoncini dovranno portare un rivestimento supplettivo fortemente isolante. (tubo gomma).

d) le eventuali protezioni metalliche, ganci di sospensione e simili devono essere fissati sopra un supporto isolante.

214. Illuminazione pubblica stradale. — La chiarezza che si può ottenere sul piano della strada dipende molto dal sistema di riflettore o diffusore applicato alle lampade e in minor misura dal potere riflettente delle facciate delle case prospicienti la strada. Perciò bisogna scegliere riflettori in relazione all'altezza sul piano stradale e alla distanza in modo che l'angolo massimo conico del flusso luminoso sia tale da non lasciare interferenze oscure fra l'una e l'altra lampada. Per la calcolazione del numero di candele può servire la formola del parag. 205 mettendo K = 35 — 40. L'altezza della lampada si può calcolare in metri:

$$h = 3{,}5 \frac{\sqrt{I}}{10}$$

dove I è l'intensità luminosa in candele delle lampade.

Come chiarezza delle strade si può ritenere da 0,5 a 1 lux per strade secondarie; da 1,5 - 4 per strade ben illuminate; da 5 a 10 lux per illuminazione viva e sfarzosa per le vie di grande traffico.

Le lampade per illuminazione stradale vengono derivate da linee speciali in modo che tutte quelle appartenenti ad una zona d'abitato si possono accendere e smorzare contemporaneamente. Per il servizio di accensione e spegnimento si adoperano molto gli orologi interruttori orari i quali contengono un orologio che a determinate ore fa scattare l'interruttore e lo fa rinchiudere. Hanno la carica automatica, oppure a mano ogni quindici o venti giorni. Per l'illuminazione di strade di città si va ora diffondendo il sistema di illuminazione stradale a corrente alternata con la lampada in serie. Le lampade hanno una tensione di qualche decina di volt ed i portalampade sono muniti di un dispositivo tale che quando si rompe il filamento viene assicurata la continuità

della corrente, impedendosi così la interruzione totale del servizio. Questi circuiti di lampade in serie sono alimentati da trasformatori aventi il primario fisso ed il secondario mobile e studiati in modo da mantenere costante l'intensità della corrente.

215. Impianti di motori elettrici. — Il primo problema che si presenta nella installazione di motori elettrici è la determinazione della potenza, velocità, tipo costruttivo più adatto. La potenza deve essere commisurata a quella massima continuativa delle macchine operatrici che il motore è chiamato ad azionare, senza eccessiva larghezza. I motori che hanno una eccessiva potenza di targhetta in confronto del carico ordinario lavorano in condizioni di basso rendimento e basso fattore di potenza.

Se le macchine operatrici hanno un regime intermittente di lavoro ossia limitato a periodi brevi di qualche minuto di lavoro alternato con periodi di carico zero (certe macchine per lavorazione del legno, del cuoio ecc.) il motore dovrà avere una potenza di targhetta pari al carico medio o di un terzo inferiore al massimo.

Per lo scopo di ottenere un buon fattore di potenza si devono del pari scegliere velocità alte, motori in corto circuito o con avviamento stella triangolo.

A seconda del pericolo di incendio e quando vi sia presenza di umidità, polveri, infiammabili ecc. nel locale ove deve essere installato il motore, i costruttori mettono a disposizione:

1.° *Motori chiusi* completamente.

2.° *Motori chiusi* con ventilazione dall'esterno e cioè mediante canali e tubi in comunicazione coll'aria esterna al locale.

3.° *Motori semichiusi* ventilati.

4.° *Motori aperti* che formano la classe più ordinaria.

Vi sono anche motori speciali per installazione in pozzi, in locali molto umidi o all'aperto o in posti poco accessibili; motori da applicarsi a pareti verticali oppure ai soffitti.

Quando si deve installare un motore di potenza superiore a 20-25 HP e si esige un cos φ alto si devono preferire i motori autosincroni o compensati.

Installazione dei motori. — I motori devono essere installati in posizioni accessibili facilmente per poter esercitare le manovre di avviamento e di pulizia; si devono tener lontani da materie combustibili; le carcasse saranno messe a terra. Dove il pericolo di incendio può avere gravi conseguenze (cotonifici ecc.) si impiegano motori chiusi. I fili di alimentazione saranno calcolati in modo di avere una caduta di tensione non superiore al 5 per cento della tensione di regime; essi saranno protetti dal contatto colle persone da tubi isolanti o da guaine forti isolanti o di piombo (cavi). I reostati saranno installati presso i motori, chiusi e riparati da opportune custodie.

Si deve assolutamente eliminare ogni installazione di motori, conduttori, interruttori dai locali pericolosissimi per presenza di materie molto combustibili, pulviscolo, gaz esplosivi. In tal caso motori ed apparecchiatura devono essere posti in locali esterni.

Apparecchiatura. — L'apparecchiatura inerente alla installazione di un motore ha i seguenti scopi: 1.° la misurazione della corrente; 2.° l'apertura e chiusura del circuito di alimentazione; 3.° la protezione contro eventuali sovraccarichi di corrente. Perciò i motori vengono muniti di un quadro marmo portante un amperometro, eventualmente un voltmetro; un interruttore con valvole.

Quando un motore è connesso ad una rete di distribuzione o a una linea di trasmissione può accadere che la corrente venga sospesa e poi ridata improvvisamente senza che si possa provvedere alla manovra dell'interruttore del quadro e dell'avviamento col reostato. Allora se il motore ha una potenza di parecchi cavalli oppure le macchine operatrici richiedono uno sforzo notevole di smarramento, si crea nel motore fermo una intensa corrente che può riscaldare e arroventare il motore. Succede talvolta pei motori trifasi, senza che il personale di sorveglianza si accorga, che venga a interrompersi la corrente in una fase. I motori trifasi una volta avviati possono funzionare anche con la corrente in due fasi ma possono anche

guastarsi per riscaldamento eccessivo per mancanza di una fase.

Ad ovviare questi pericoli, ai motori di grande potenza e a tutti quelli che non possono essere sotto una continua e diretta sorveglianza di adatto personale, si applicano interruttori automatici di massima corrente e per tensione zero o per interruzione di una fase. Questi automatici sono indispensabili per i motori che azionano pompe.

Regole speciali sono elencate nelle Norme degli Impianti pubblicate a cura della Associazione Elettrotecnica Italiana.

216. Concetti di tarifficazione della energia elettrica. — Gli impianti di distribuzione di energia elettrica hanno un carattere immobiliare come quello delle case d'affitto ed il costo dell'energia dipende, in prima linea, dalle spese di interesse e ammortamento del capitale impiegato e in seconda linea dalle spese di manutenzione, sorveglianza, amministrazione, tasse che incombono sull'esercizio dell'impresa. Il capitale è rappresentato dalle centrali generatrici dell'energia, linee di trasmissione sottostazioni, reti di distribuzione. Negli impianti idroelettrici tutte le spese accennate sono in buona parte costanti o fisse e cioè indipendenti dalla potenza delle centrali nelle diverse ore della giornata e dal numero delle ore di utilizzazione. Perciò suddividendo le spese annue sopra accennate per il numero dei KW-ora vendibili in un anno si ottiene il prezzo medio o di base delle tariffe.

Il costo di impianto delle centrali termoelettriche per ogni KW di potenza installata è in generale minore di quello delle centrali idroelettriche (da L. 2000 a L. 4000 per KW) ma nell'esercizio delle termoelettriche si aggiunge la spesa notevole del combustibile consumato.

Non tutta l'energia producibile dagli impianti generatori può essere venduta; infatti mentre un chilowatt di potenza installata in centrale può produrre in un anno 365×24 ossia 8760 KW-ore, la utilizzazione effettiva oscilla fra 3000 e 4000 ore. Causa di ciò è che il diagramma di consumo dalle reti di distribuzione non è costante e continuo ma varia molto a seconda delle ore della giornata, a seconda che predomina il consumo per forza motrice o per luce o per trazione.

Nelle regioni industriali la richiesta d'energia è maggiore

di giorno che di notte; sale rapidamente alla mattina e cade alla sera alla chiusura degli stabilimenti. Nelle città invece il consumo è fortissimo alla sera nelle ore di massima illuminazione e minore nelle ore diurne e di tarda notte.

A questo diagramma fortemente variabile di consumo si adattano bene le centrali idroelettriche munite di serbatoi stagionali e diurni in quanto l'energia elettrica prodotta corrisponde esattamente all'acqua consumata dalle turbine. Ma per gli impianti idroelettrici sopra corsi d'acqua perenne si ha un enorme sciupìo di acqua nelle ore di minor carico. Da ciò la necessità di mettere in parallelo queste centrali con quelle a serbatoio, in modo che le centrali ad acqua perenne fanno la base del diagramma, mentre quelle a serbatoio fanno le punte.

Agli effetti della vendita dell'energia si capisce che il suo valore varia a seconda delle ore di utilizzazione e della potenza poichè è più profittevole alle imprese l'utente che consuma per un maggior numero di ore al mese in confronto di quello che consuma maggior potenza con un piccolo numero di ore.

Il concetto fondamentale che si segue per stabilire le tariffe di vendita d'energia per forza motrice e spesso anche per illuminazione consiste nel praticare una tariffa fissa per ogni chilowatt impegnato dall'utente sia che consumi poco o molto e di praticare ribassi sensibili sul prezzo dei chilowatt-ora consumati, in modo da favorire le maggiori ore di utilizzazione.

217. Tariffe. — I sistemi più in uso di tariffe sono: 1.° ad *abbonamento od a forfait*; l'utente paga un tanto fisso all'anno od al mese per ogni candela, per ogni watt o per ogni cavallo installato o consumato nel suo impianto. E' una tariffa molto semplice applicabile solo per illuminazione, piccole forze motrici, apparecchi di riscaldamento. Il sistema favorisce gli abusi di consumo ed è difficilmente controllabile.

2.° a *forfait con limitatore; la tariffa* è come la precedente, ma all'utente è impedito di consumare una potenza superiore a quella impegnata per mezzo di un piccolo interruttore automatico di massima detto limitatore.

3.° *a contatore semplice*, cioè in base ad un prezzo per KW-ora e per tutti i chilowattora segnati da un contatore applicato all'impianto dell'utente. E' il sistema più diffuso per le piccole utenze di illuminazione.

4.° *a contatore con doppia tariffa*. Il contatore è munito di un orologio a carica mensile il quale ogni giorno a determinate ore sposta l'albero del disco sopra due quadranti in modo da registrare l'energia consumata, per esempio, nelle ore di giorno e quella consumata nelle ore di notte. Ai due consumi si applicano tariffe diverse. Naturalmente la tariffa nelle ore di minor carico delle centrali è più bassa e perciò favorisce l'utente che usa l'energia in quelle ore.

5.° *a contatore differenziale*. L'utente impegna una certa potenza per il proprio impianto, pagando un tanto per KW-mese o per KW-anno. Superando detta potenza il contatore differenziale segna il consumo di eccedenza oltre la potenza impegnata ed a questo si applica una tariffa piuttosto alta perchè le ore di utilizzazione sono molto limitate.

6.° *tariffa scalare secondo le ore di utilizzazione*. Presso l'utente viene installato un contatore e un indicatore di massimo; la liquidazione mensile si ottiene dividendo i KW-ora consumati per la potenza massima e risultano così le ore medie di utilizzazione. A queste ore si applicano prezzi scalari, per esempio L. 0,40 al KW-ora per le prime 150 ore; L. 0,30 per le successive 100 ore; L. 0,25 per le successive 100 ore, ecc. Esempio: Un utente impegna 10 KW per 150 ore mensili (consumo minimo). Effettivamente ha consumato 12 KW con 4000 KW-ora. La tariffa è stabilita L. 0,30 per le prime 150 ore; 0,25 per le successive 100 ore; 0,20 per le successive 100. La liquidazione si fa come segue:

12 × 150	= 1800	kWh	a L.	0,30
12 × 100	= 1200	»	a »	0,25
resto	= 1000	»	a »	0,20
	4000			

Ecco che aumentando le ore di utilizzazione il prezzo medio del KW-ora diminuisce.

7.° *Tariffa mista a forfait e contatore.* All'utente si applica una tariffa di un tanto a forfait per ogni KW di massima richiesta e in più un tanto per KW-ora. A Milano le nuove tariffe per forza motrice con questo sistema stabiliscono L. 30 mensili per ogni KW prelevato nel mese e in più dei prezzi scalari per KW-ora scalari da L. 0,38 a L. 0,12 a seconda che la potenza consumata varia da 3 a 200 KW. In tal modo il prezzo medio del KW-ora decresce in ragione inversa delle ore di utilizzazione e della potenza.

TERZA PARTE

CAPITOLO XVI

Nozioni di radiotelegrafia e radiotelefonia.

218. Onde elettromagnetiche od onde Hertziane. — Se noi mettiamo in comunicazione un pezzo di conduttore isolato, teso nell'aria, con uno dei poli di una sorgente di elettricità, mentre l'altro polo si mette a terra, si forma una brevissima corrente detta *corrente di spostamento, capacitativa* o *di carica*. Il conduttore resta elettrizzato, ossia intorno ad esso si forma un *campo elettrico* (parag. 5) rappresentabile da un flusso di linee di forza tra il conduttore e il suolo. La densità del campo è proporzionale alla carica ossia anche alla differenza di potenziale fra il conduttore e la terra. Nell'istante della carica la corrente crea per proprio conto intorno a se un *campo magnetico* intorno al conduttore. Per creare tanto l'uno che l'altro campo bisogna spendere dell'energia rappresentata dal prodotto volt × ampère × tempo.

Supponiamo ora di collegare il nostro conduttore ad una sorgente di elettricità alternata. In esso si svilupperanno ad ogni periodo un flusso e riflusso di corrente e nello spazio circostante un campo elettromagnetico alternativo propagantesi nello spazio sotto forma di onde colla velocità della luce ossia di 300.000 Km. al minuto secondo (esattamente 299820).

Se la frequenza della corrente alternata fosse di 1 periodo al 1" si formerà nello spazio una successione di onde com-

plete lunghe 300.000 Km.; se la frequenza fosse di 2 - 3... - 10 - 100 - 1000.000 le onde avranno una lunghezza rispettivamente di 150.000 - 100.000.... - 3000 - 300 - 0,3 chilometri. Perciò la lunghezza λ di un'onda è data in metri:

$$\lambda = \frac{300\,000\,000}{\text{frequenza}}$$

Ossia per creare onde di λ metri di lunghezza occorre una frequenza di corrente alternata:

$$f = \frac{300\,000\,000}{\lambda}$$

Le frequenze usate nelle radiotrasmissioni vanno da 10 a 60.000 *chilocicli* (Kc) (1 chilociclo = frequenza 1000), e perciò le lunghezze d'onda variano da 30.000 a 5 m. Si dicono *onde lunghe* quelle fino a 200 m. e *onde corte* quelle inferiori a 200 m. Le due specie di onde hanno caratteristiche speciali. Nelle conferenze internazionali radiotelegrafiche di Washington, Parigi, si è cercato di suddividere la vastissima gamma da 10 a 60.000 Kc. in tanti gruppi da assegnarsi agli Stati, alle Società, in modo da evitare una situazione caotica nell'esercizio delle stazioni emittenti.

Ogni gruppo di frequenze è diviso in sottogruppi destinati ai seguenti servizi: telegrafia fissa, telegrafia mobile o marittima, radio diffusione, radio amatori. Certe determinate frequenze sono destinate alle chiamate e ai soccorsi. Inoltre tutte le grandi stazioni emittenti statali o delle compagnie r. t. hanno stabilito degli orari per le trasmissioni nelle diverse direzioni o per le diverse stazioni riceventi.

L'emissione delle onde si fa mediante le *antenne* od *aerei* che sono dei fili tesi nell'aria orizzontalmente (potrebbero essere anche verticali) ed aventi una estremità libera e l'altra collegata colla terra ma attraverso delle spirali o bobine nelle quali si provocano delle f. e. m. alternative alle frequenze sopraindicate. *Il circuito dell'antenna è quindi aperto; esso forma l'armatura di un condensatore di cui l'altra armatura è formata dalla terra.* (Fig. 386).

Date le altissime frequenze usate nella radiotelegrafia e telefonia, ed il fenomeno dello Skin effect (parag. 85) per

creare i flussi e riflussi di corrente di carica e scarica nella armatura-antenna occorrono di solito altissime tensioni; molta parte dell'energia si sperde nello spazio.

Contemporaneamente all'irradiazione aerea avviene una irradiazione di corrente nella terra dal piede dell'aereo.

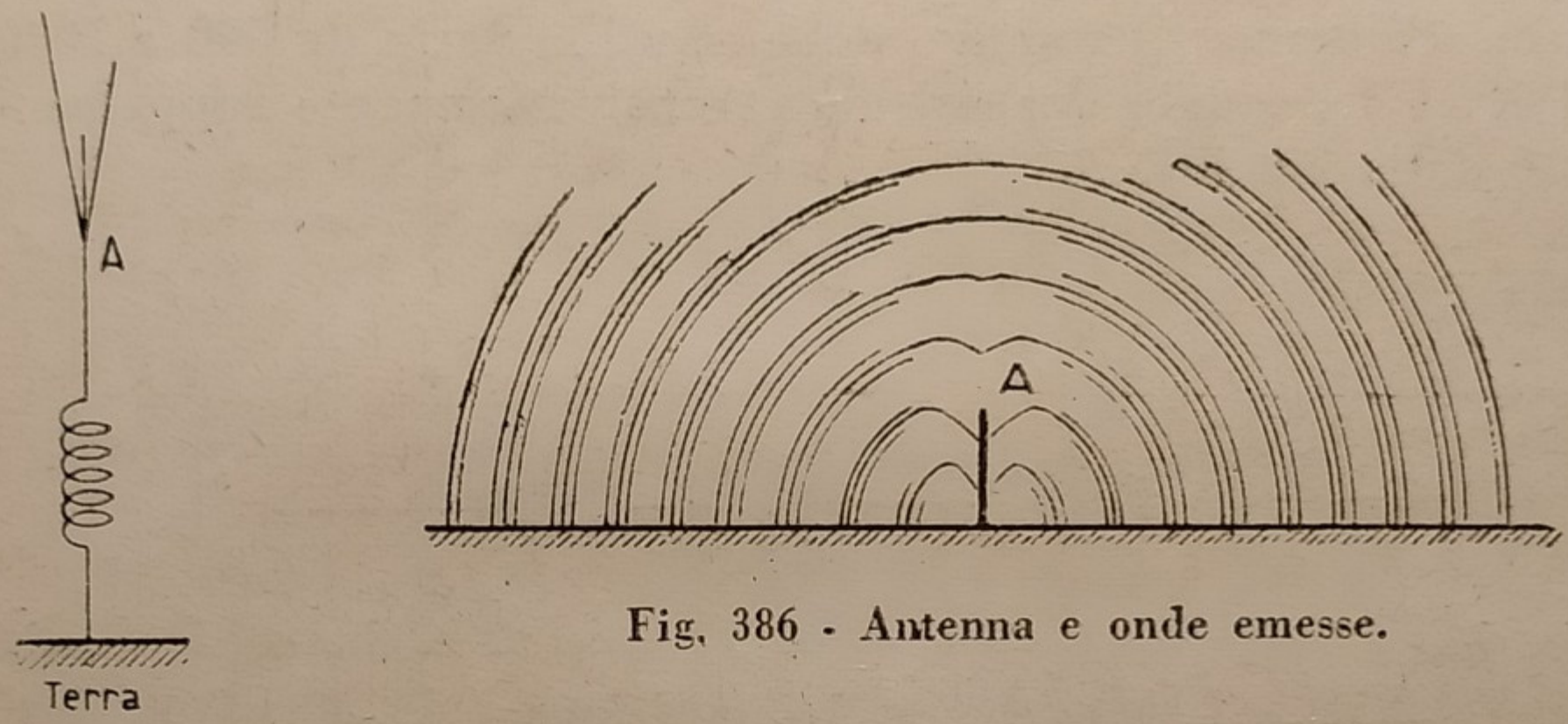


Fig. 386 - Antenna e onde emesse.

Le onde migranti che si irradiano nello spazio assumono una forma stratificata intorno all'antenna, e si possono ritenere formate da linee di forza elettriche verticali o leggermente inclinate con piede alla terra mentre le linee di forza magnetiche sono formate da circoli orizzontali che si allargano all'infinito e si deformano a seconda dell'andamento della superficie.

L'esperienza ha fatto riscontrare che le onde corte da 200 a 10 m. di lunghezza (da 1500 a 300.000 Cc.) si possono trasmettere a maggior lontananza delle onde lunghe e con molto minor dispendio di energia. Però intorno all'antenna per qualche centinaio di Km. lasciano una zona d'ombra o di debolissima percezione. E' pure noto che le trasmissioni r. t. si fanno meglio di notte che di giorno, specialmente se sono onde lunghe.

219. Generazione dellè oscillazioni. — Per generare nelle antenne, e più precisamente nelle bobine ad essa direttamente collegate, le tensioni alternative ad alta frequenza vi sono quattro sistemi: 1. *a scintilla*; 2. *con alternatori*; 3. *ad arco voltaico* (*Duddel o Poulsen*); 4. *con valvole termoioniche.*

Col primo sistema si fanno scoccare delle scintille in uno spinterometro che fa parte di un circuito oscillante (vedi paragrafo seguente) ed adoperando una corrente industriale qualsiasi o di pile o accumulatori. Ogni scintilla provoca nel circuito oscillante delle correnti alternate la cui frequenza dipende dai valori della capacità e induttanza inseriti e dal circuito d'antenna. Il numero delle scintille varia da 500 a 1000 al 1". Un esempio del sistema è schematicamente rappresentato dalla fig. 387.

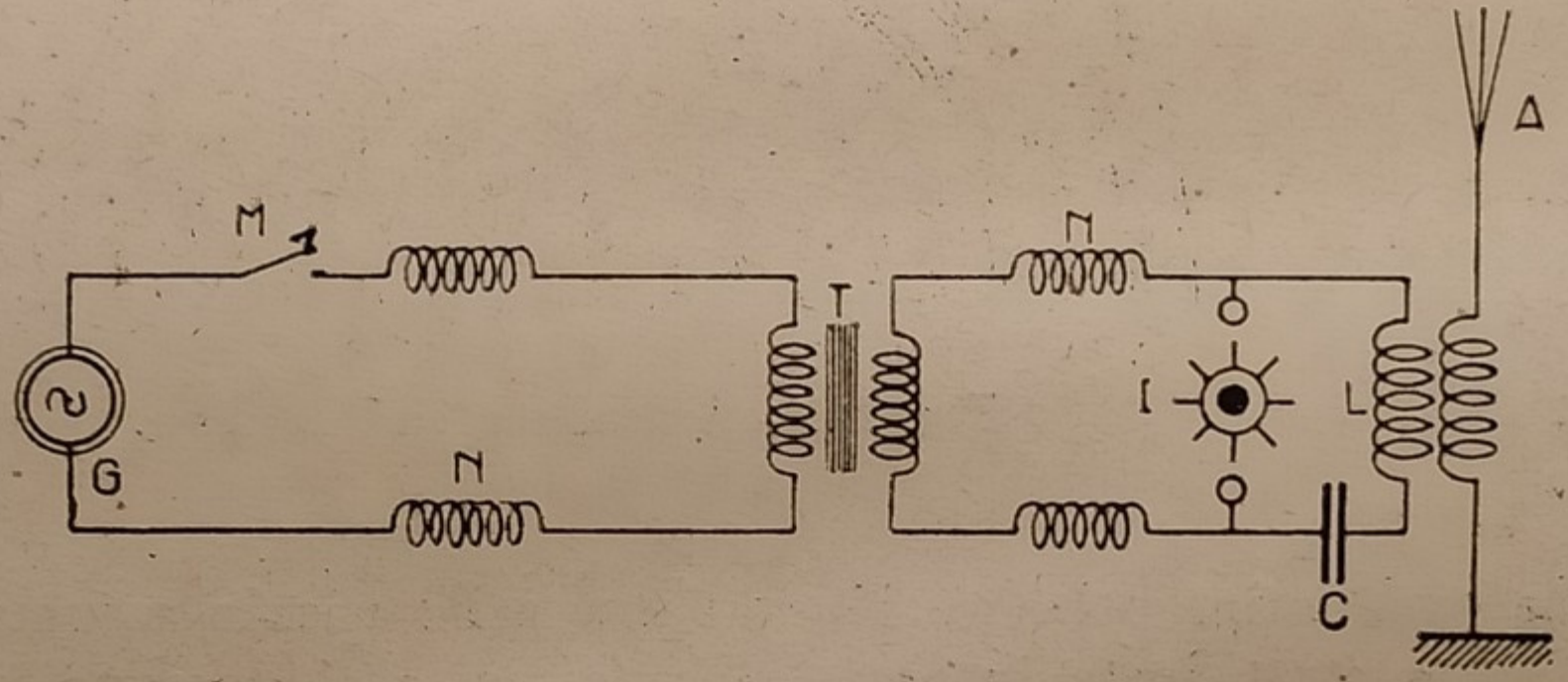


Fig. 387 - Applicazione di un oscillatore ruotante Marconi (onde smorzate).

In questa figura il generatore G alimenta il primario di un trasformatore T attraverso al manipolatore M dei segnali e delle bobine d'impedenza. Nel secondario è inserito in derivazione una ruota I con molte punte in modo che girando crea una serie di scintille. Il circuito oscillante è formato dal condensatore C e dalla induttanza L accoppiata al circuito di antenna. Le induttanze N servono a impedire il ritorno degli impulsi ad alta frequenza verso il generatore. I sistemi a scintilla benchè semplici hanno perduto quasi completamente terreno perchè danno delle onde a intermittenza o treni di onde degradanti o smorzate, mentre gli altri danno onde continue e cioè vere correnti alternate ad alta frequenza.

La fig. 388 rappresenta lo schema di un generatore ad arco voltaico Poulsen fondato sul seguente fenomeno: se fra due elettrodi di un arco voltaico alimentato da una dinamo si fa una derivazione contenente una bobina di self (induttanza) e un condensatore in esso si generano correnti oscillanti con

frequenza ben definita dai valori della induttanza e capacità inserite.

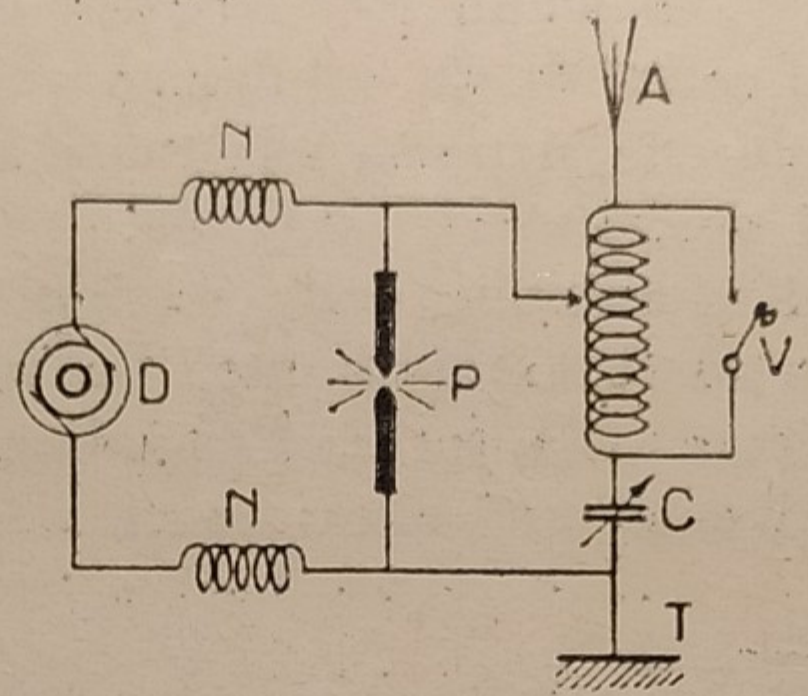


Fig. 388 - Schema di applicazione di un arco Poulsen per una stazione radiotelegrafica (onde persistenti).

Le grandi stazioni emittenti italiane sono munite di generatori ad arco voltaico; in altre stazioni europee sono invece applicati gli alternatori ad alta frequenza (da 7000 a 10.000 cicli).

Ma il sistema più diffuso e che tende a soppiantare gli altri è quello basato sulle valvole termoioniche di cui parleremo più avanti.

La fig. 389 rappresenta le *onde smorzate* date dai generatori a scintilla e le *onde persistenti* date dai generatori ad arco, dagli alternatori, dalle valvole termoioniche.

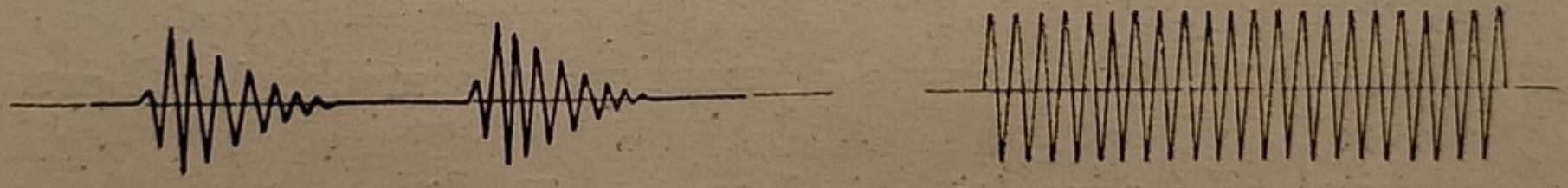


Fig. 389 - Onde smorzate e onde persistenti o continue.

Le onde persistenti sono indispensabili per la radio telefonia; invece per la radio telegrafia si preferisce di adoperare treni d'onde d'alta frequenza sia smorzate sia persistenti. Di solito la *frequenza dei gruppi o treni d'onde* per radiotelegrafia, è *musicale*, ossia da 500 a 5000 gruppi al 1" in modo che i segnali Morse vengono ricevuti al telefono con note chiare musicali che si distaccano dai suoni caotici che si producono per influenze atmosferiche.

220. Circuiti oscillanti. — L'elemento principale dei circuiti adoperati nelle r. t. sia per l'emissione che per la recezione dei segnali e dei suoni è il *circuito oscillante*. Esso si compone essenzialmente di un condensatore in serie con una induttanza in modo che si possa effettuare il fenomeno della risuonanza da noi descritto al parag. 88.

Di solito anzi le antenne delle stazioni emittenti e riceventi formano un circuito oscillante. La parte aerea fa da condensatore insieme alla terra. Per spiegare il comportamento dei circuiti oscillanti riferiamoci alla fig 390.

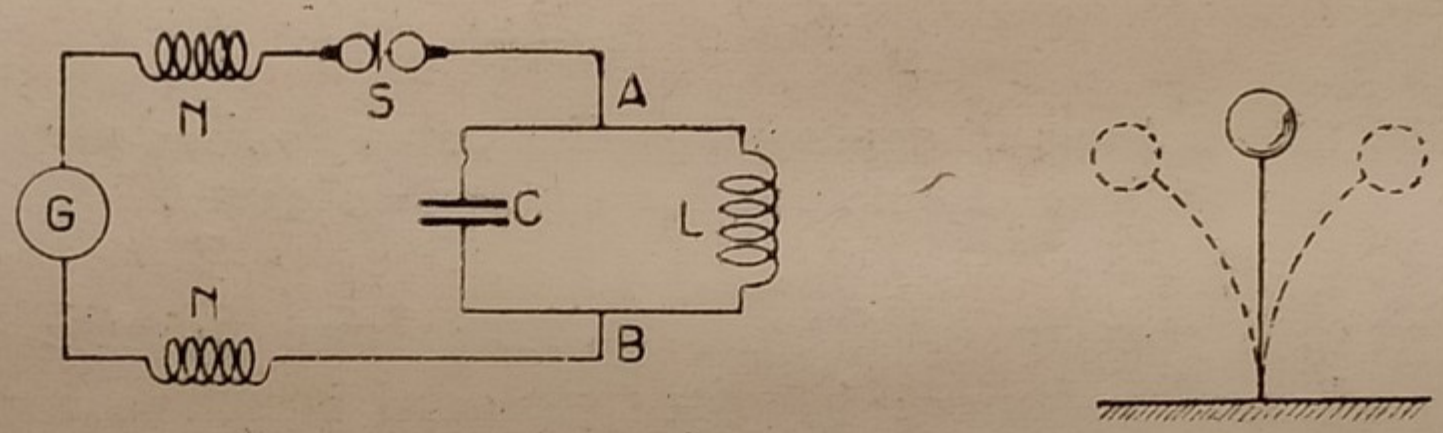


Fig. 390 - Circuito oscillante e molla oscillante.

Se per mezzo del generatore G comunichiamo attraverso ad uno spinterometro S un impulso, ossia una scintilla istantanea, al circuito oscillante costituito dal condensatore C in serie coll'induttanza L, il condensatore si carica formando un campo elettrico tra le armature. Cessato l'impulso l'energia del campo elettrico si scarica sotto forma di corrente nella induttanza L. In quest'ultima si crea un campo magnetico e, quando questo sarà arrivato al massimo si scaricherà sul condensatore C. Si otterrà così un flusso e riflusso di energia scambievole fra capacità e induttanza. Tra i punti A e B si crea una tensione alternativa e nel circuito oscillante una corrente pure alternativa sfasata di 90° rispetto alla tensione di AB. Se non vi fossero disperdimenti per effetto Joule, il giuoco continuerebbe all'infinito; ma siccome non è possibile eliminare le dispersioni, l'energia comunicata dal primo impulso andrà smorzandosi; ossia le correnti indotte nel circuito oscillante saranno smorzate; *ad ogni scintilla nello spinterometro S si avrà un gruppo o treno di onde*. Per quanto è stato detto al parag. 84 la condizione di risonanza è espressa dalla eguaglianza:

$$2 \pi f \, L = \frac{1}{2 \pi f \, C}$$

da cui si cava:

$$f = 2 \pi \sqrt{\frac{1}{L \, C}}$$

in queste formole f è la *frequenza naturale* del circuito; L e C l'induttanza e la capacità espresse in henry ed in farad. La lunghezza delle onde emanate dal circuito oscillante si ricava combinando questa formola con quella del paragrafo 218 e si ottiene la formola pratica:

$$l = 1885 \sqrt{L \times C} \quad \text{in metri}$$

dove L e C sono espressi in microhenry e in microfarad.

La proprietà principale di un circuito oscillante è la seguente: se invece di un sol impulso a scintilla si eccita il circuito con degli impulsi successivi, oppure con una tensione alternativa di frequenza uguale a quella naturale, l'energia degli impulsi successivi si somma e si accumula e cioè tensione e corrente vanno aumentando e l'aumento continuerebbe all'infinito se non vi fossero le inevitabili dispersioni di energia dovute all'effetto Joule, alle correnti di Foucault, ecc.

Il fenomeno è paragonabile a quello di una molla oscillante alla quale vien comunicato un piccolo impulso ad ogni oscillazione pendolare (fig 390). In questo caso le oscillazioni tendono ad ampliarsi finchè gli impulsi sono compensati dalle perdite per resistenza dell'aria o di altro genere.

Quando un circuito oscillante è sollecitato a vibrare nel modo sopradetto si dice che è in risonanza colla frequenza degli impulsi che gli provengono dall'esterno; oppure anche è *sintonizzato* con essi. Un circuito oscillante sintonizzato è già un amplificatore degli impulsi esterni; se non vi fosse *sintonia* perfetta di frequenza fra questi impulsi e quella naturale del circuito, questo non può entrare in oscillazione non essendovi possibilità di accumulare l'energia dei successivi impulsi. L'oscillatore rimarrebbe inerte, sordo.

Negli apparecchi radio i circuiti oscillanti sono inseriti in due modi: 1.° mettendo capacità e autoinduzione (induttanza) in parallelo come è indicato dalla figura precedente. In tal caso quando il circuito oscillante è sintonizzato ossia in risonanza colla frequenza in arrivo in AB, esso assorbe energia e cioè rappresenta in generale una forte resistenza. 2.° mettendo invece l'induttanza L e la capacità C in serie su AB, il circuito oscillante così fatto, quando è in risonanza può essere paragonato ad una resistenza assai più piccola di quella del caso precedente ed assimilabile quasi ad un corto circuito.

In generale si deve ritenere che un condensatore rappresenta una ostruzione quasi assoluta alla corrente continua ed un libero passaggio alla corrente alternata alta frequenza. Viceversa un'induttanza o bobina di self rappresenta una resistenza forte ed anche una ostruzione alla corrente alternata ed alle pulsazioni della continua mentre lascia un libero passaggio alla corrente continua.

L'azione di resistenza o più esattamente l'*impedenza* offerta nei due casi alla corrente alternata dipende dalla capacità, dal numero delle spire e dalla frequenza (vedere formole parag. 78 e 85 del capitolo correnti alternate). Quanto più alta è la frequenza nelle bobine di self tanto maggiore è la impedenza e l'ostruzione alla corrente. Invece nei condensatori tanto minore è la impedenza quanto maggiore è la frequenza. Da ciò il modo di filtrare correnti musicali o telefoniche dalle correnti radio trasmittenti.

Sintonizzare un apparecchio ricevente vuol dire modificare il valore di C o di L del circuito oscillante in modo da ritrovare attraverso alla risonanza la frequenza voluta, ciò che si rivela da una grande ampiezza della corrente e dal suono dei ricevitori.

Su questa proprietà caratteristica si fonda il modo di creare nelle stazioni emittenti delle onde di una determinata frequenza e di mettere le stazioni riceventi in grado di ricevere e di distinguere nella immensa gamma di frequenze (da zero a parecchi milioni) quella che importa di ricevere. Così è permesso nelle audizioni radiotelefoniche in mezzo alle centinaia di onde di diversa frequenza provenienti dalle

molte stazioni emittenti e che riempiono lo spazio nelle ore serali, di raccogliere con grande nitidezza quelle di una sola stazione e di poter individuare la provenienza quando si sia in grado di conoscere esattamente la frequenza della stazione emittente.

Vedremo più avanti il modo in inserire nei circuiti delle antenne emittenti o riceventi i circuiti oscillatori.

221. Modulazione delle onde trasmittenti per radio telefonia. — Si premette che i suoni percepibili all'orecchio variano da 100 a 10000 vibrazioni al 1"; la frequenza della nota più alta di un pianoforte è di 5000; ogni suono musicale o di voce umana è risultante di una vibrazione fondamentale di bassa frequenza e di parecchie armoniche che vi si sovrappongono con frequenze ed ampiezze molto diverse e complesse. Dal rilievo esatto delle onde sonore prodotte dalle vocali ad esempio, si è trovato che sono composte da una fondamentale di frequenza fra 200 e 250 e dalla sovrapposizione di tre fino a dieci armoniche di frequenza fra 400 e 2000.

Dato che per attuare radiotrasmissioni è necessario ricorrere a frequenze d'onda fra 10.000 e 10 milioni al minuto secondo, si è pensato di sovrapporre le onde sonore con tutte le loro armoniche trasformate in correnti elettriche attraverso i microfoni, sulle onde ad alta frequenza in modo da variarne l'ampiezza.

Nella fig. 391 abbiamo rappresentato in (a) una serie di oscillazioni elettriche persistenti; in (b) una corrente microtelefonica; in (c) la serie delle oscillazioni persistenti, non più ad ampiezza costante, ma variabile secondo le modulazioni di (b); in (d) le stesse oscillazioni di (c) ma rettificate.

Le oscillazioni (a) formano le *onde portanti*; quelle indicate con (c) le *onde modulate;* esse sono composte dalle onde persistenti che variano di ampiezza secondo linee di cresta corrispondente alle onde musicali (o di bassa frequenza).

Ricordiamo che un *ricevitore telefonico* o cuffia è formato da una membrana di ferro affacciata contro un piccolo elettromagnete polarizzato. Se nella bobina del piccolo elettromagnete si inviasse la corrente alternata ad alta frequenza sia pure modulata ottenuta dall'apparecchio ricevente, il ricevi-

tore telefonico non darebbe nessun suono, essendo le vibrazioni di frequenza altissima non percettibili all'orecchio.

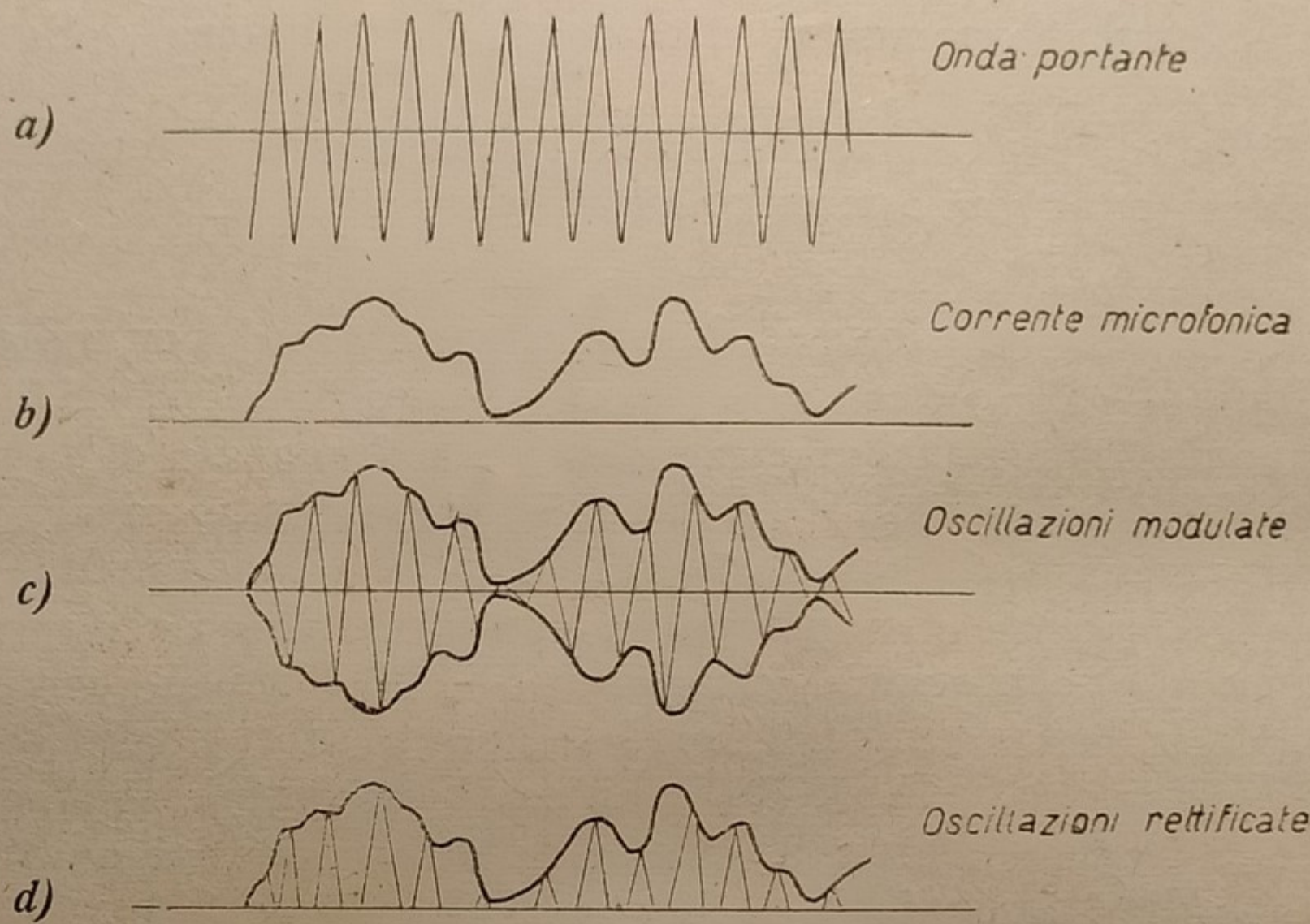


Fig. 391 - Modulazione delle onde oscillanti.

Affinchè il ricevitore abbia a tradurre in suono la modulazione impressa alle oscillazioni ad alta frequenza occorre che queste siano *rettificate* cioè trasformate in correnti *continue* pulsanti secondo la modulazione. Solo in tal caso la membrana del ricevitore può vibrare e riprodurre il suono.

Anche per la radiotelegrafia nella quale si ricevono i segnali Morse per mezzo di cuffie, e cioè di suoni, occorre di modulare le onde trasmittenti o riceventi secondo note musicali; vedremo più avanti il modo. Però mentre per radiotelegrafia possono bastare frequenze di onde portanti di 10.000 - 15.000 periodi al 1", per la radiotelefonia occorrono frequenze di almeno 40 a 50 mila periodi 1".

La modulazione delle onde trasmittenti si ottiene intercalando nel circuito oscillante o nel generatore che lo alimenta il secondario di un piccolo trasformatore nel cui circuito primario è inserito un microfono con una pila. (Fig. 392).

In questo schema M è il microfono colla pila P; T un trasformatore delle vibrazioni fono-elettriche; G un genera-

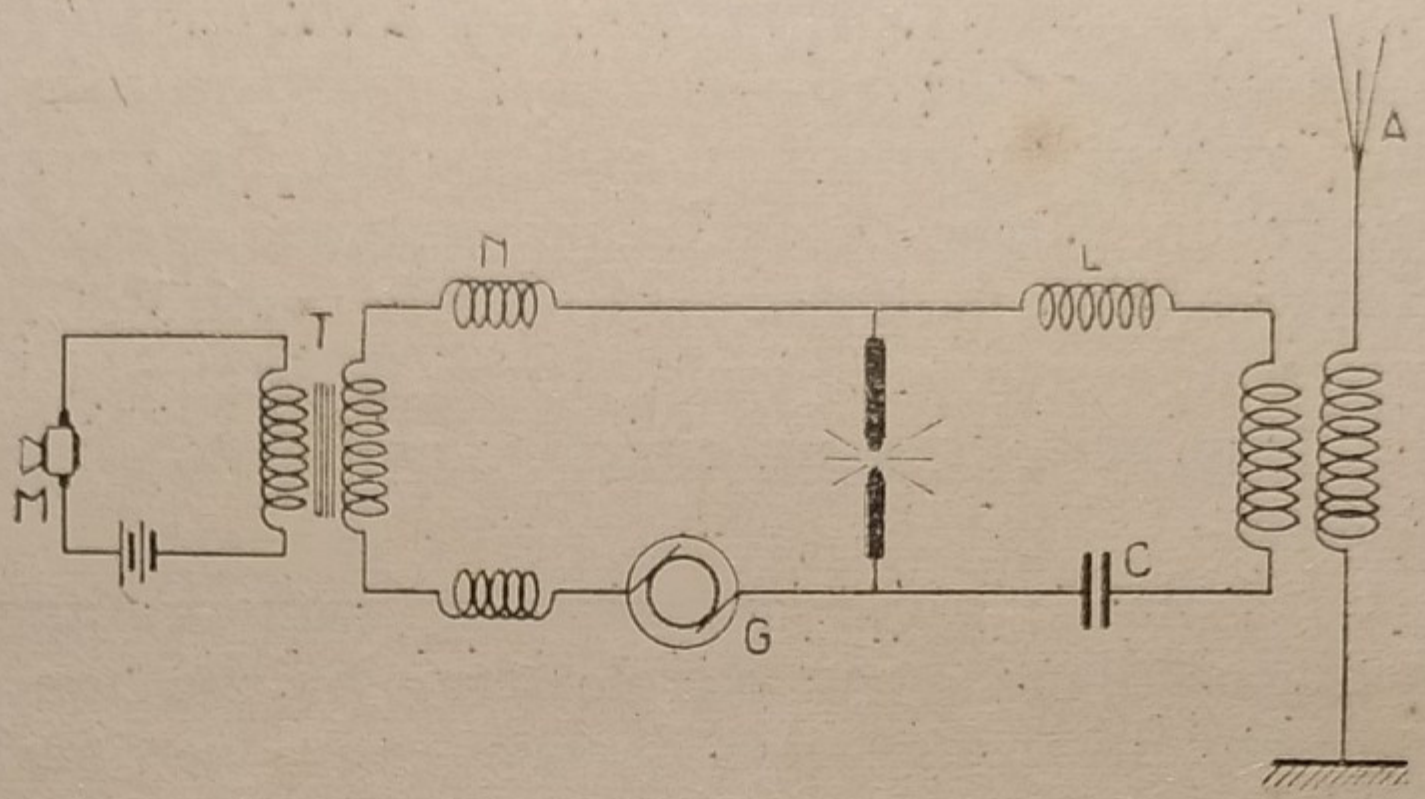


Fig. 392 - Schema generico per modulazione delle onde di una stazione emittente ad arco voltaico.

tore a corrente continua che alimenta un arco Poulsen P; L, C il circuito oscillante costituito da un'auto induzione L e da un condensatore C; vi è poi un trasformatore che comunica le oscillazioni modulate del circuito oscillante all'antenna A. La modulazione avviene sovrapponendo alla corrente continua di G la corrente secondaria di T che riproduce i suoni emessi al microfono M.

222. Ricezione dei segnali e dei suoni. — Le onde elettromagnetiche od *hertziane* (da Hertz sommo fisico che sperimentò e definì queste onde) si possono captare con qualsiasi conduttore (antenna) teso nell'aria, isolato, collegato alla terra attraverso un circuito oscillante contenuto nell'apparecchio ricevente, il quale sia accordato o sintonizzato per la frequenza delle onde a riceversi. L'antenna e la terra si possono considerare come le opposte armature di un condensatore eccitato dal campo elettrostatico delle onde hertziane viaggianti.

Le correnti elettriche che si formano nelle antenne sono dell'ordine di centesimi di microampère e per essere percepite dai telefoni richiedono spesso di essere ingrandite, rettificate e amplificate.

Un secondo metodo di captare le onde hertziane consiste nel formare delle spirali di filo fortemente isolate dalla terra e di orientarle in modo da tagliare le linee di forza magne-

tiche viaggianti lungo la superficie della terra. *Il sistema dicesi di recezione col quadro* perchè di solito la spirale è avvolta in forma di un quadrato e di rombo. La recezione col quadro è meno efficace di quella per antenna, però permette di distinguere, girando intorno ad un asse verticale il quadro, la direzione di arrivo delle onde. Anche il sistema del quadro esige la connessione con un circuito, oscillante e un mezzo amplificatore.

Come abbiam visto le correnti alta frequenza amplificate con circuiti oscillanti e con valvole termoioniche non possono ancora essere utilizzate; esse devono essere rettificate ossia rese unidirezionali affichè si possano percepire coi telefoni. Qui conviene distinguere alcuni casi pratici.

Nella radiotelegrafia i segni Morse (punti e lineette) sono ricevuti di solito col telefono. Se le onde della stazione emittente sono smorzate allora rettificando le correnti di antenna e inviandole nel telefono, questo vibrerà in ragione della frequenza dei treni d'onda ossia dei gruppi di scintille. Per esempio per un *punto Morse* segnalato con un *la* acuto occorrono da 10 a 40 scintille o treni d'onda e per una linea da 35 a 170 scintille, al minuto secondo.

Se invece di treni di onde a frequenza musicale la radiotrasmissione telegrafica è fatta con emissioni di treni onde persistenti corti o lunghi a seconda che si vuol segnalare punti o linee dei segni Morse, allora la lamina del telefono ricevente non ha modo di vibrare; essa segnerà ad ogni segnale una vibrazione sola ossia dei punti brevissimi e secchi.

Per rendere udibili i segnali all'arrivo nel circuito della corrente d'antenna si inserisce un vibratore detto *ticker* il quale modula localmente le onde rendendole musicali; il ticker non fa altro che creare rapidissime interruzioni regolari o far variare la ampiezza delle onde ricevute.

Il sistema però più usato per la recezione telegrafica ad onde persistenti consiste nell'aggiungere al circuito di antenna (o derivato da esso) una oscillazione persistente e continua poco differente della frequenza delle onde creata localmente mediante un circuito oscillante eccitato da pila. La corrente risultante delle due frequenze (come nel caso dei *battimenti* quando si fa il parallelo fra due alternatori) è una corrente

alternata di frequenza pari alla differenza delle due componenti. Si può regolare la frequenza del generatore locale (detto *eterodina*) in modo di ottenere come frequenza di battimento una frequenza musicale e cioè direttamente percepibile col telefono.

223. Valvole termoioniche. - Diodi. — Queste valvole sono fondate sul fenomeno che i corpi incandescenti emettono un flusso di elettroni (elettricità negativa) verso i corpi carichi di elettricità positiva (detti perciò anodi). Due sono i tipi: *diodi* cioè a due elettrodi e *triodi* cioè a tre elettrodi.

La valvola a due elettrodi o di Fleeming si compone di un bulbo di vetro (fig. 393) ad alto vuoto contenente un fila-

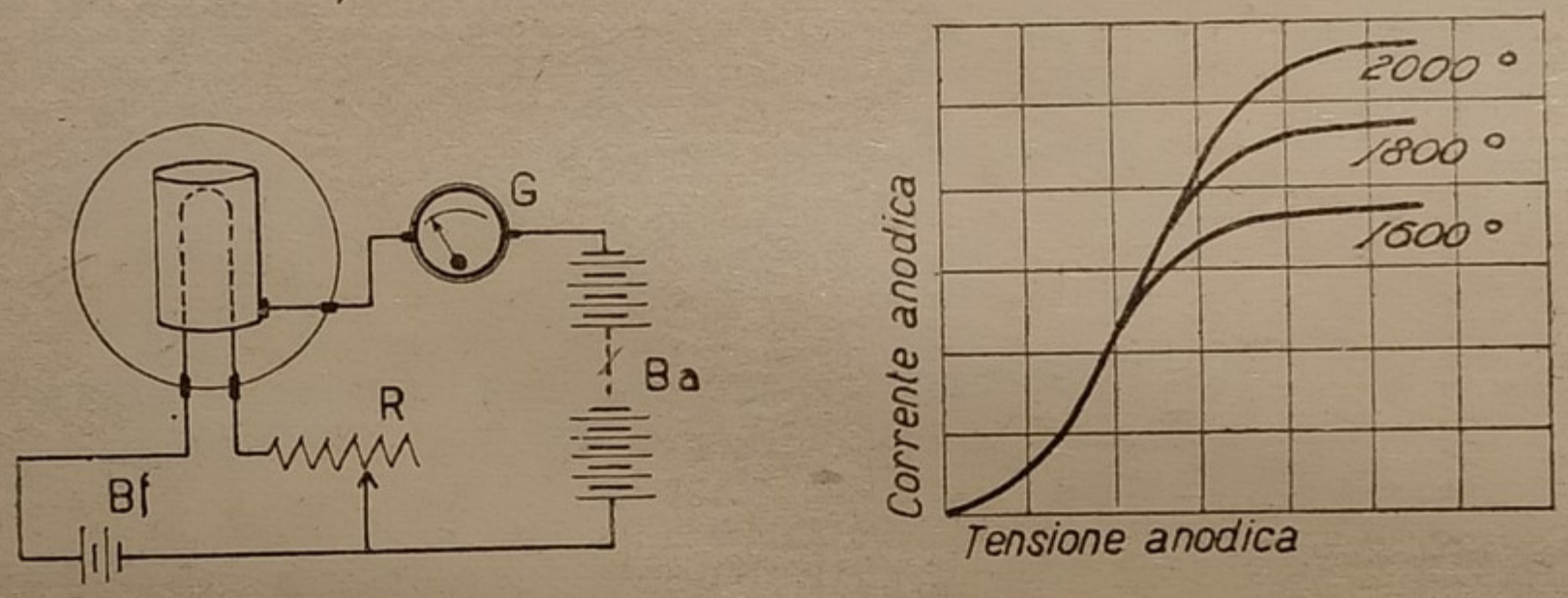


Fig. 393 - Diodo o valvola a due elettrodi.

mento di tungsteno reso incandescente dal passaggio di una batteria di accumulatori o pile a bassa tensione (4-10 volt). Il filamento è circondato da un tubo metallico che si chiama *placca*; esso è congiunto col polo + di una batteria, detta *anodica* mentre il polo — si congiunge con uno dei fili che alimentano il filamento che fa da catodo. La tensione della batteria anodica varia da 40 a 100 V e nei grandi tipi fino a qualche migliaio di volt. Si nota che tutte le volte che il filamento s'accende, un milliamperometro a corrente continua inserito nel circuito di placca segna corrente. Se si inverte la polarità della batteria anodica cessa ogni segno di corrente. Da esperimenti semplici si nota che la corrente di placca entro certi limiti è proporzionale alla tensione anodica e alla temperatura del filamento. (Vedi diagramma fig. 393).

Se invece di batteria anodica si applica un generatore a

tensione alternata la corrente diventa *continua pulsante*. Se invece di un generatore a tensione alternata si intromette un circuito oscillante accoppiato ad antenna ricevente, nel circuito anodico si forma una corrente continua pulsante, ma di ampiezza variabile a seconda della modulazione delle onde: il diodo serve quindi da rettificatore e rivelatore delle onde modulate e perciò un telefono inserito traduce in suoni le modulazioni. La fig. 394 rappresenta uno schema di un apparec-

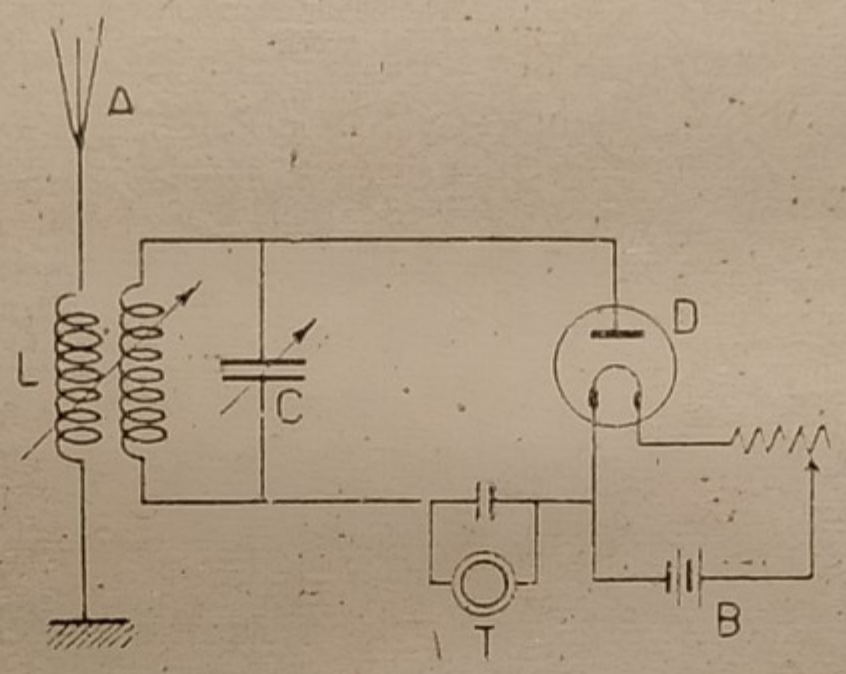


Fig. 394 - Schema di stazione ricevente a diodo per onde smorzate. A antenna; L C circuito oscillante; D diodo; T telefono.

chio ricevente con diodo, antenna accoppiata a un circuito oscillante sintonizzato L C e telefono ricevente T. Però di solito ai diodi si sostituiscono i triodi, limitando la loro funzione principale alla rettificazione delle correnti alternate per la carica di batterie.

224. Valvole a tre elettrodi o triodi. — Le moderne *valvole a tre elettrodi* o triodi constano di un bulbo di vetro con vuoto altissimo contenente il filamento incandescente di tungsteno e torio funzionante da catodo, di un cilindretto di lamina metallica (o placca) avvolgente il filamento e che funziona da anodo; di una spirale di filo o di una reticella metallica interposta fra anodo e catodo che si dice *griglia*. (Figure 395-396).

Il circuito esterno della placca deve sempre essere collegato col circuito del filamento attraverso ad una batteria o dinamo che di solito svolge una tensione di 40 a 200 V. Questa batteria serve a mantenere rispetto al filamento, un sensi-

bile potenziale positivo, onde attrarre il flusso degli elettroni o corpuscoli negativi.

Il filamento viene di solito alimentato da uno o due elementi di accumulatori; nei grandi modelli anche con dinamo a bassa tensione. Nel circuito del filamento si inserisce sempre una resistenza regolabile per poter rendere più o meno incandescente il filamento.

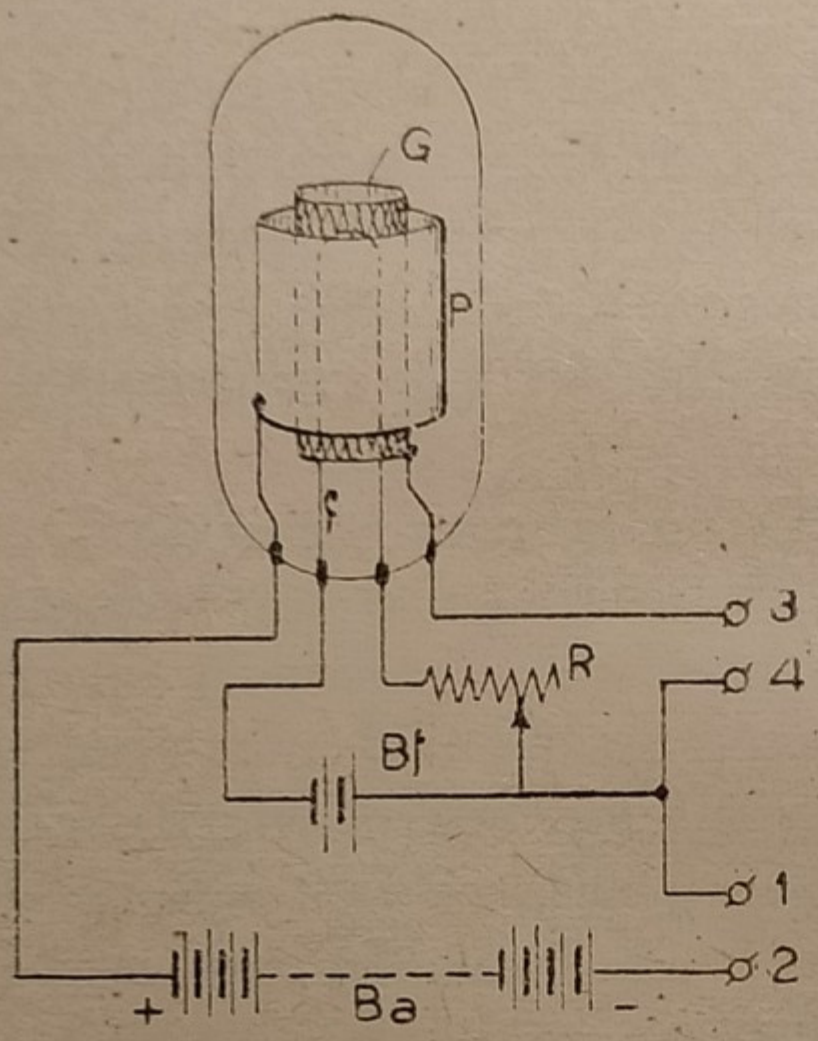


Fig. 395 - Valvola a tre elettrodi Ba batteria anodica; Bf batteria di accensione.

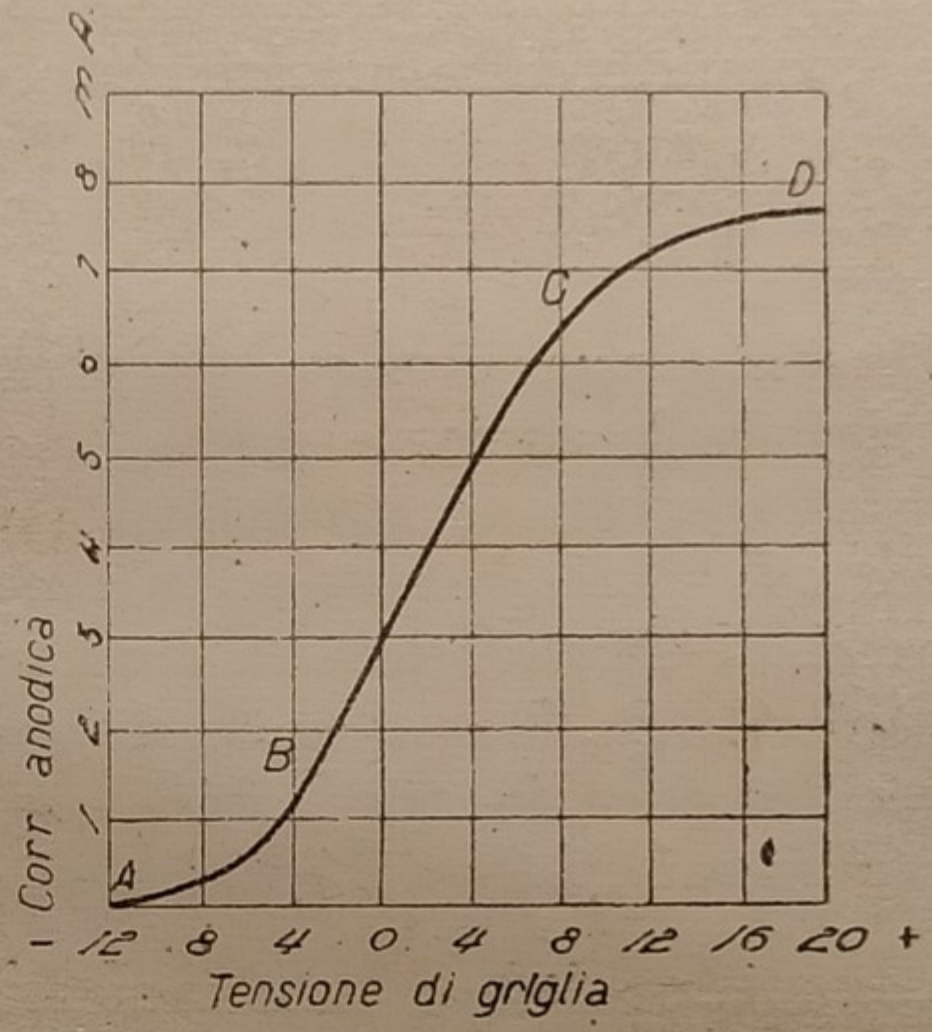


Fig. 396 - Curva caratteristica della corrente di placca in funzione della tensione di griglia.

La presenza della griglia ha questo effetto: se si comunica ad essa (per rispetto al filamento) una piccola carica positiva, la corrente elettronica che si dirige alla placca viene intensificata. Se la carica di griglia diventa negativa essa crea un ostacolo al passaggio del flusso degli elettroni verso la placca respingendoli verso il filamento con forza tanto più grande quanto maggiore è la tensione negativa di griglia. Il fenomeno si può rappresentare con delle curve caratteristiche una delle quali è data dalla fig. 396.

In essa sopra l'asse della ascisse sono riportate in volt le tensioni di griglia mentre sull'asse delle ordinate sono riportati i valori degli ampère, milliampère od anche microampère del circuito di placca. Da questa curva si vede che

passando la tensione di griglia da negativa a positiva di pochi volt (da 0 a 12 V) la corrente di placca si eleva lentamente, poi, rapidamente e quindi di nuovo lentamente. Si ha cioè una curva con due gomiti A B e C D mentre nel tratto B C, a piccole variazioni della tensione di griglia di pochi volt corrispondono grandi variazioni della corrente di placca. Si ha quindi un effetto amplificatore ed il rapporto fra le correnti di placca e di griglia può variare da 4 a 20. La griglia si comporta come un rubinetto che regola il flusso elettronico o come un relais telegrafico. Per far funziomare il triodo nel tratto BC conviene alle volte di dare un potenziale base alla griglia positivo con qualche elemento di pila; così si rende possibile una perfetta proporzionalità fra le variazioni di griglia e la corrente di placca.

La curva caratteristica ABCD varia come nei diodi a seconda della incandescenza del filamento e della tensione anodica. Diminuendo la tensione anodica la curva si sposta verso destra. La corrente di placca è unidirezionale; inoltre essa è senza inerzia e cioè essa risponde senza ritardo alle variazioni di tensione della griglia; perciò se la tensione di griglia varia colla frequenza delle onde anche la corrente di griglia varia colla stessa frequenza.

Si dice *coefficiente di amplificazione* il rapporto fra la variazione della tensione di placca e quella di tensione di grigia; esso dipende anche dalla resistenza del circuito anodico. Si dice *impedenza* della valvola il rapporto fra la variazione della tensione di placca e la variazione corrispondente di corrente di placca. Si dice *pendenza* la variazione della corrente di placca in mA corrispondente alla variazione di 1 volt alla griglia.

Il pregio grandissimo dei triodi — inventati dall'americano Forest — è di poter adempiere sia simultaneamente sia separatamente le funzioni indispensabili nelle radio trasmissioni e cioè: 1.° da *rivelatori* o *detector* o *rettificatori* delle oscillazioni; 2.° da *amplificatori* delle oscillazioni ossia da trasformatori di variazioni piccolissime di tensione, in grandi variazioni di corrente a spese della batteria anodica; 3.° da *generatori di oscillazioni*.

225. Il triodo come rivelatore. — Riferendoci al diagramma della fig. 396 si osserva subito che le onde modulate di tensione sulla griglia e che si suppongono provenienti da antenna, hanno un effetto diverso sul circuito di placca a seconda che esse interessano i gomiti AB o CD oppure il tratto rettilinea BC. Se le oscillazioni si compiono sul tratto BC si ha nel circuito di placca una corrente unidirezionale ma oscillante in modo simmetrico e cioè con le creste in alto e in basso come indicate dalla fig. 391-c. Si ottiene una perfetta amplificazione, senza distorsioni ma un telefono inserito nel circuito di placca resterebbe muto perchè la lamina di ferro dell'apparecchio subisce vibrazioni alternativamente in senso contrario rispetto al valore medio della corrente continua.

Se invece si fanno agire le oscillazioni di tensione della griglia sul tratto AB (o CD) della caratteristica del triodo, la corrente di placca assumerà impulsi assimetrici, cioè la cresta di modulazione sarà più sviluppata in alto che in basso e perciò la lamina del telefono sarà più o meno attratta con sforzi proporzionali alla cresta superiore di modulazione e perciò ripeterà il suono.

Le fig. 397 - 398 rappresentano schemi di rettificazione. Col primo di essi si può variare il potenziale base di griglia mediante una pila.

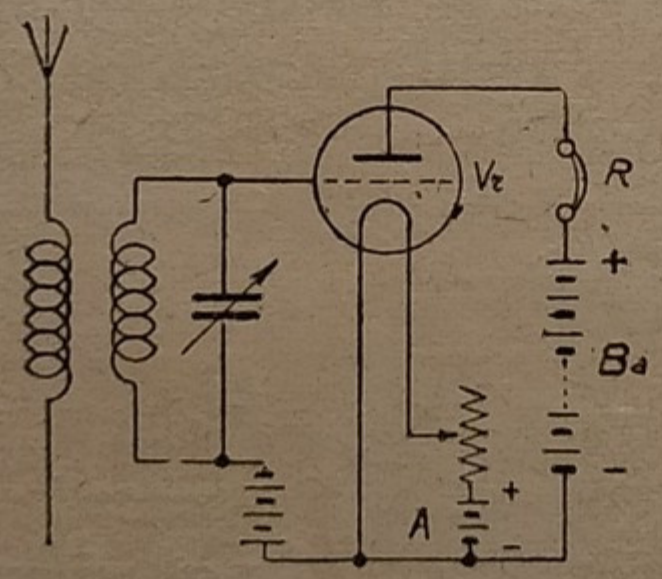


Fig. 397 - Rettificazione con corrente di placca o anodica.

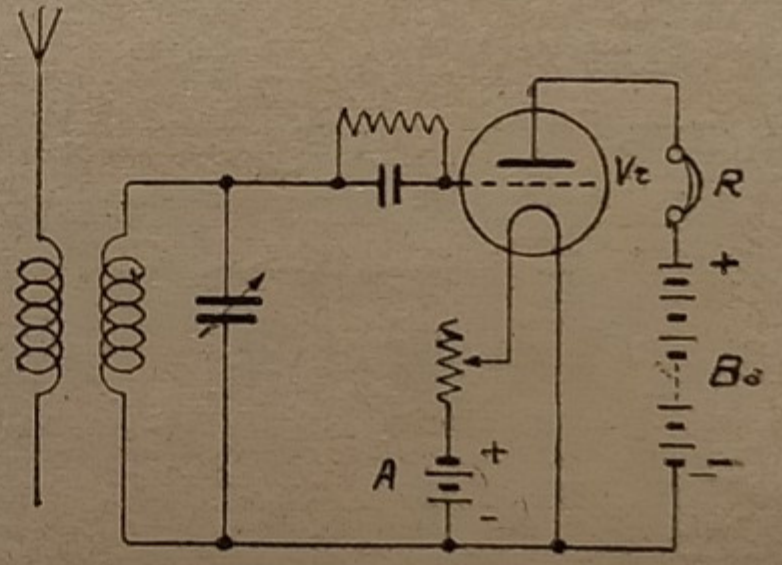


Fig. 398 - Rettificazione con metodo condensatore shuntato.

La fig. 399 dà lo schema di un posto ricevente radiotelegrafico. Di solito il ricevitore telefonico non si inserisce di-

rettamente nel circuito di placca ma coll'intermezzo di un piccolo trasformatore a nucleo di ferro.

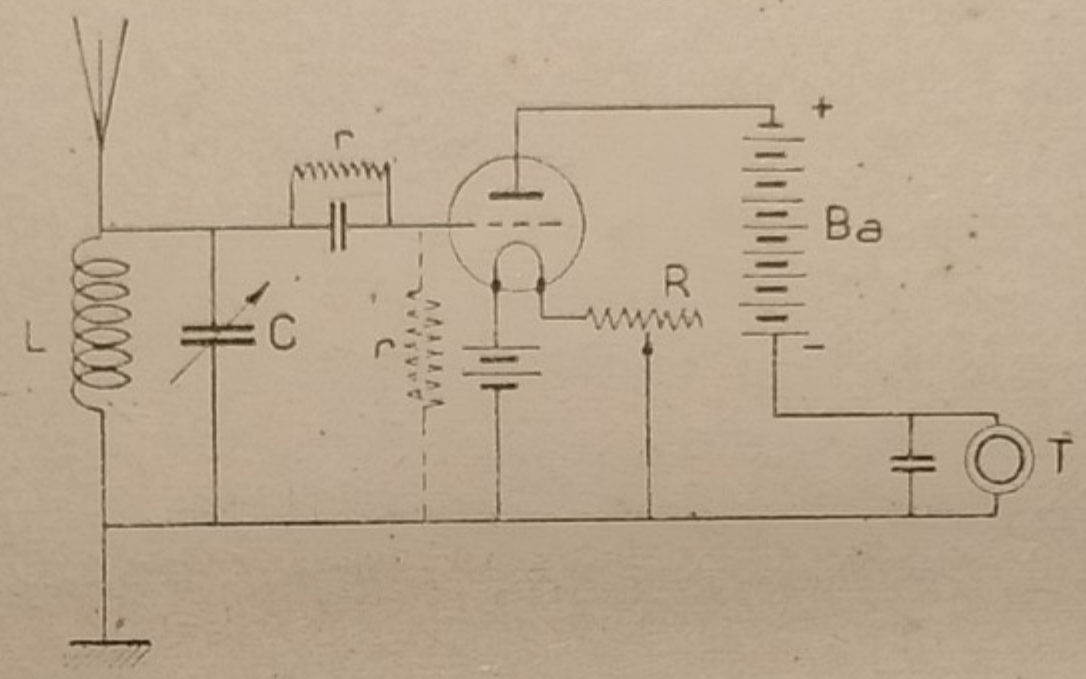


Fig. 399 - Posto ricevente con una sola valvola rettificatrice
A antenna; L, C, circuito oscillante di sintonia; Ba batteria anodica;

226. Il triodo come amplificatore. — L'amplificazione si fa tanto sulle correnti o tensioni ad alta frequenza provenienti dall'antenna, quanto sulle correnti di placca di un triodo rivelatore. Il triodo rivelatore o valvola di rettificazione precede le valvole amplificatrici di bassa frequenza e segue le valvole amplificatrici ad alta frequenza. Tanto sull'alta che sulla bassa frequenza si possono fare due o tre stadi di amplificazione. In quest'ultimo caso si mette in comunicazione la placca del primo triodo amplificatore colla griglia della seconda valvola. Ma la griglia richiede variazioni di tensione di 5 a 12 volt (valvole comuni) mentre la placca esige tensioni nell'ordine di 50 a 200 volt. Perciò bisogna studiare speciali accoppiamenti tra placca di una valvola e griglia della successiva; molti sono i sistemi e fra essi quelli indicati dalla fig. 400.

Nella prima l'accoppiamento tra le due valvole è fatto con trasformatore variabile (variometro); nella seconda con un condensatore shuntato da una resistenza r. I morsetti 1 e 2 sono quelli da collegarsi colla successiva valvola rettificatrice.

E' facile intuire che data la grande reattanza $2 \pi fL$ dovuta all'alta frequenza, i trasformatori, i variometri, le bobine di reattanza inserite nei circuiti alta frequenza degli

apparecchi mittenti e ricevitori devono essere senza nucleo di ferro. Invece nei collegamenti a bassa frequenza e nei ricevitori telefonici si possono impiegare trasformatori e bobine con nucleo di ferro.

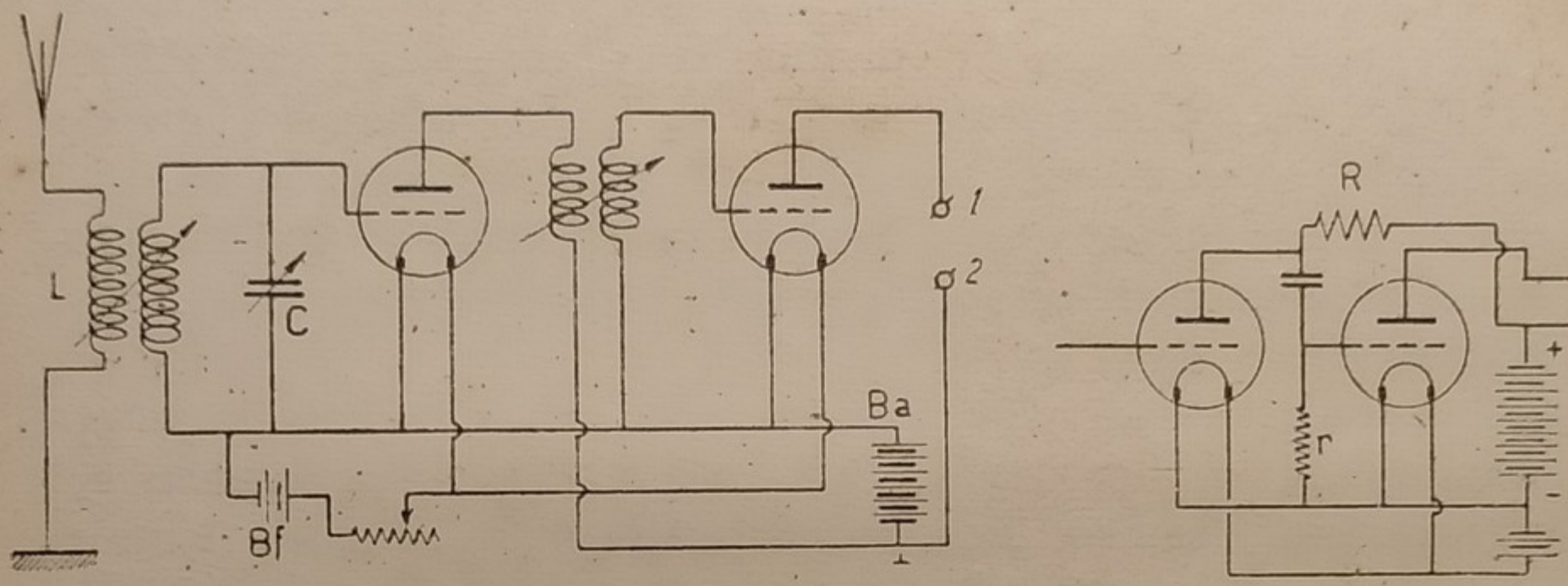


Fig. 400 - Schemi di circuiti amplificatori alta frequenza in due stadi con accoppiamento aperiodico.

Per imprimere una più perfetta risonanza e una sintonizzazione netta negli apparecchi riceventi colla frequenza d'antenna, l'accoppiamento delle valvole di amplificazione alta frequenza e di rettificazione si può fare attraverso circuiti oscillanti regolabili. Tale sistema si dice di *amplificazione periodica* per distinguerla da quella *aperiodica* rappresentata dalla fig. 400. Ecco invece un esempio di collegamento periodico nella fig 401.

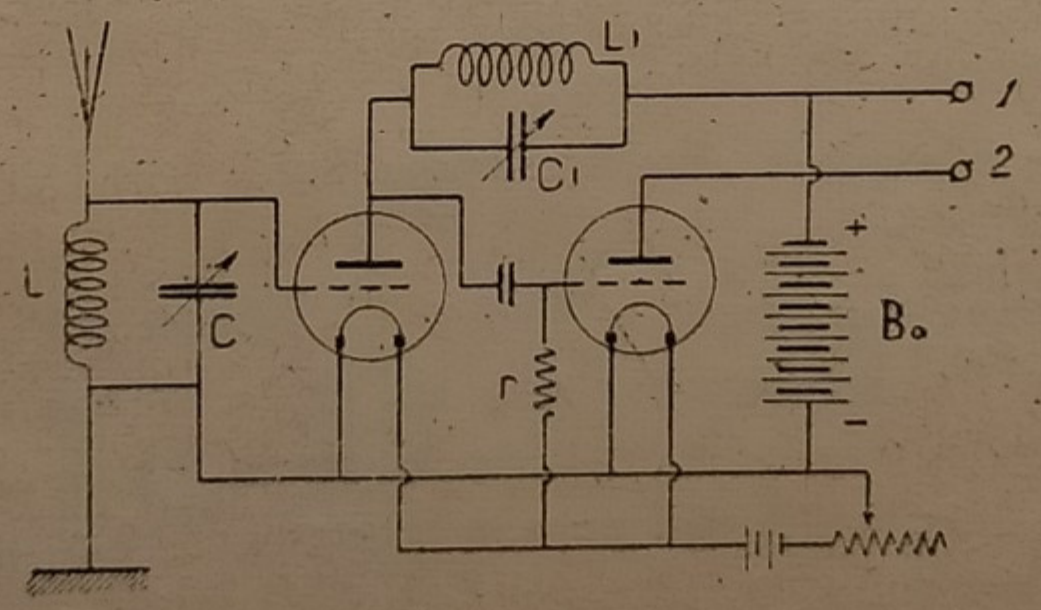


Fig. 401 - Schema di amplificatore ad alta frequenza con accoppiamento periodico accordato.

L'accoppiamento placca-griglia è fatto con condensatore shuntato con una forte resistenza; ma il circuito placca filamento della prima valvola contiene un circuito oscillante L_1 C_1. I morsetti 1 e 2 vanno collegati alla valvola rivelatrice.

L'amplificazione di bassa frequenza (telefonica) si ottiene facendo passare la corrente di placca della valvola rivelatrice nel primario di un piccolo trasformatore a nucleo di ferro con rapporto 1 : 2,5 — 1 : 5. Al secondario si ha una tensione alternata a frequenza telefonica; questa tensione viene comunicata alla griglia della prima valvola amplificatrice.

La corrente di placca di quest'ultima viene messa in comunicazione colla griglia della seconda valvola oppure col ricevitore telefonico. Alle griglie delle valvole amplificatrici bisogna dare un potenziale negativo con una pila (5 — 12 V). Il circuito di bassa frequenza non richiede nè sintonia nè circuiti oscillanti.

La fig. 402 dà lo schema di amplificazione in due stadi.

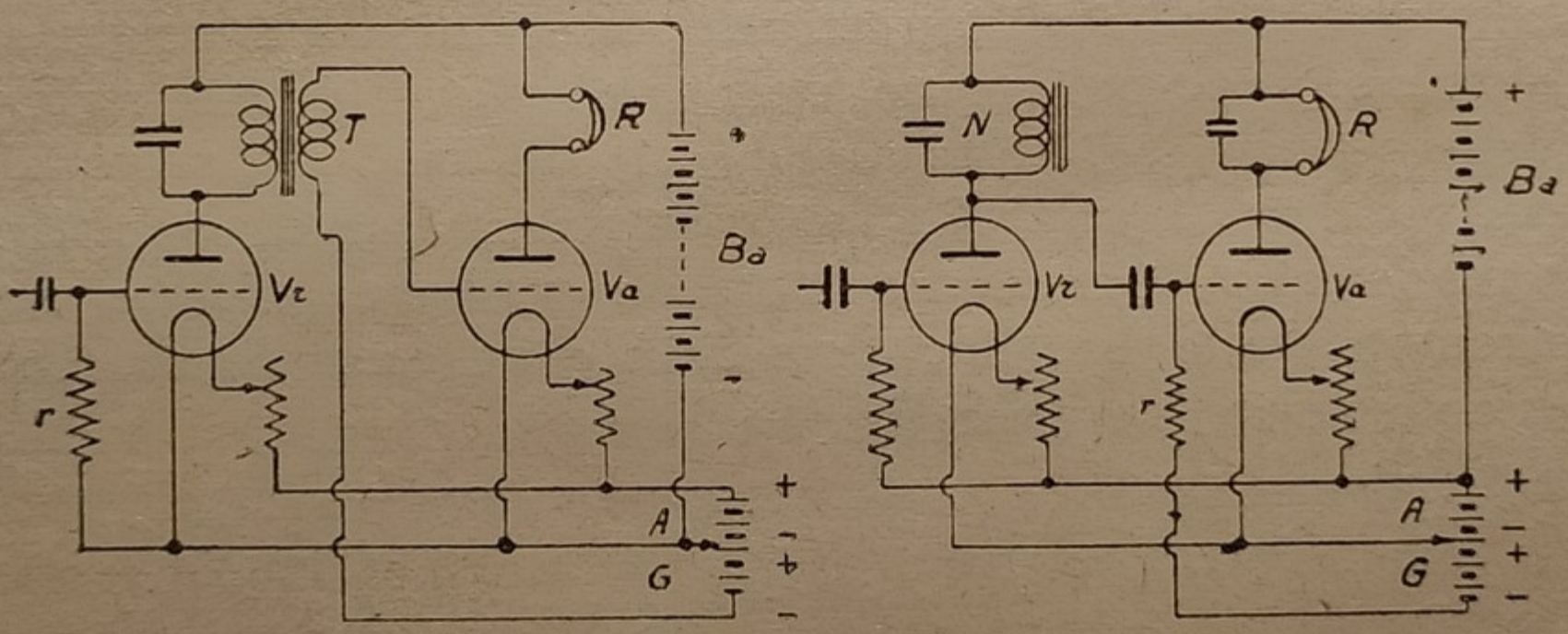


Fig. 402 - Schemi di amplificazione in b. f. con due stadi.

227. Il triodo come oscillatore. - Reazione. — Il triodo può funzionare come generatore di onde persistenti e come tale è di gran lunga più applicato degli altri sistemi negli apparecchi e impianti radiotrasmittenti. Naturalmente a seconda della potenza trasmessa dalle antenne (che può variare da una decina di watt a parecchi chilowatt) variano le dimensioni ed i potenziali di placca possono arrivare a parecchie migliaia di volt.

Gli schemi adottati sono svariatissimi ma in tutti si ritrova un circuito oscillante inserito su quello di placca ed accoppiato per mezzo di trasformatori (senza ferro), con induttanze, con capacità ecc. alla griglia dello stesso triodo (vedi fig. 403).

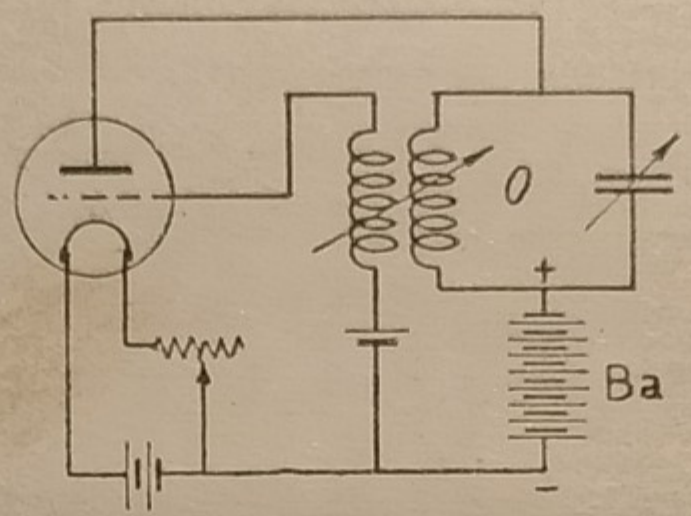


Fig. 403 - Schema di circuito oscillante mediante triodo.

La griglia viene cioè alimentata a spese del circuito di placca. Chiudendo questo circuito si forma un primo impulso che dà luogo alla formazione successiva di oscillazioni nel circuito oscillanti O. Queste si trasmettono istantaneamente alla griglia e perciò esaltate ed amplificate.

Il sistema dicesi in *reazione* o in rigenerazione e viene applicato non solo nelle stazioni emittenti come oscillatore locale di onde persistenti per l'alimentazione delle antenne (dicesi allora *eterodina*) ma anche negli apparecchi riceventi per amplificare le onde ricevute. In questo caso la valvola compie il triplice ufficio; come amplificatrice, come rivelatrice e come oscillatrice (dicesi in tal caso *endodina*).

La fig. 404 offre due schemi di amplificazione e rettificazione in reazione. L'accoppiamento fra placca e griglia è induttivo nel primo e capacitativo nel secondo.

Il primo schema è impiegato per recezioni telegrafiche poichè se l'accoppiamento fra L e L_1 è stretto nel circuito L C si producono oscillazioni permanenti con frequenza di risonanza; queste interferendo con le oscillazioni di antenna danno luogo al fenomeno di battimento. La frequenza battimento, mediante opportuna regolazione del circuito oscillante L L_1 può essere resa musicale. Nella placca del triodo avremo della corrente rettificata pulsante colla nota musicale e perciò udibile direttamente col ricevitore.

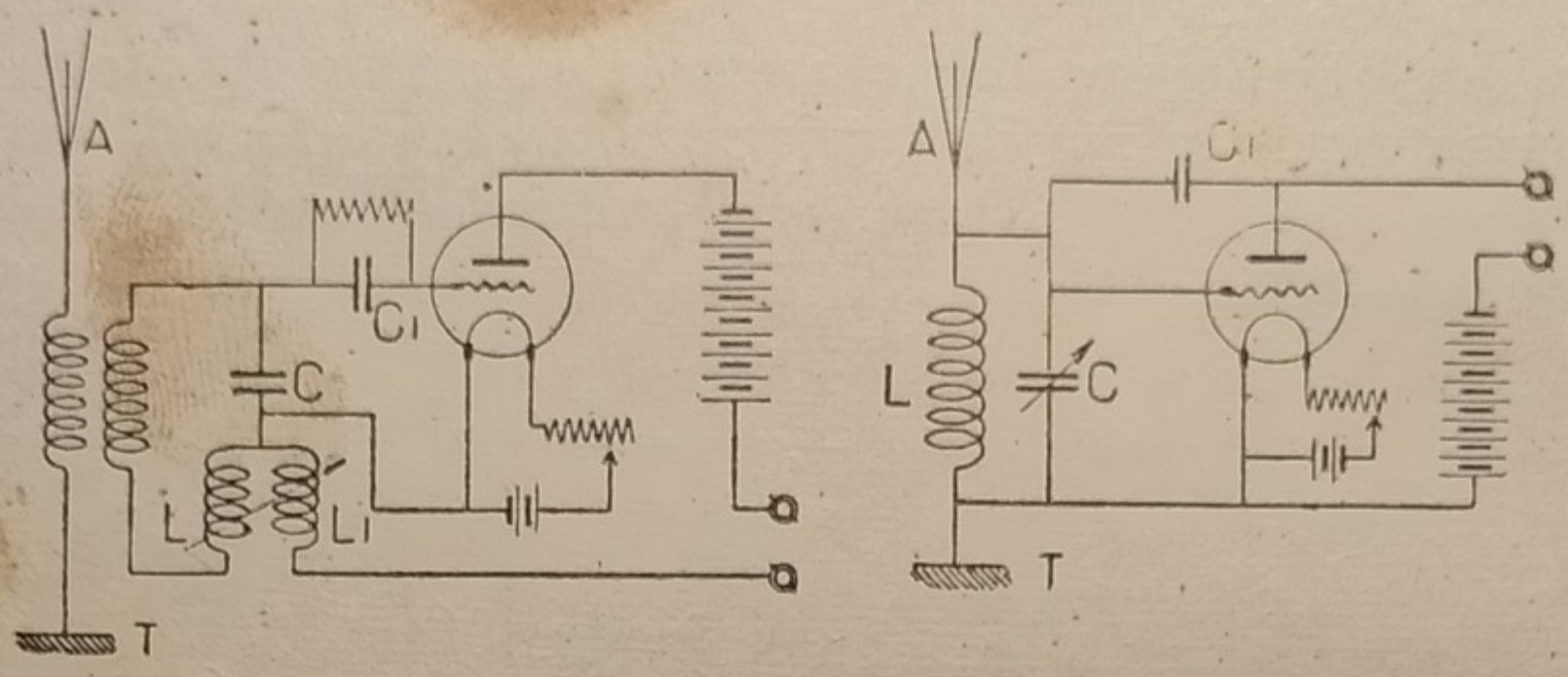


Fig. 404 - Schema di circuiti a reazione.

Il 1.° schema della figura 404 è di autodina. Se l'accoppiamento L L_1 si lascia molto *lasco* (cioè debole, allontanando le due bobine) si può avere la sintonizzazione del circuito oscillante con l'antenna e l'eliminazione di oscillazioni locali. In tal caso la stessa valvola serve per rettificazione e amplificazione e si adatta anche a ricezioni di radiodiffusioni.

228. Tipi diversi di valvole. — Si trovano in commercio molte varietà di valvole:

1. - Triodi a consumo normale con filamento di filo di platino e iridio ricoperti di torio e che consumano da 0,2 a 0,3 Amp.

2. - Triodi a consumo ridotto con filamento di tungsteno toriato e che consumano appena 0,06 - 0,08 Amp.

Queste valvole poi si suddividono in valvole per sola amplificazione o per sola rettificazione; valvole a elevata o bassa impedenza; valvole trasmittenti; valvole finali o di potenza per gli ultimi stadi di amplificazione a bassa frequenza.

3. - Valvole a 4 elettrodi o *tetrodi* che hanno doppia griglia delle quali una normale ed una ausiliaria. Quest'ultima si intromette fra la prima ed il filamento e viene polarizzata positivamente con una d. di p. pari o poco inferiore a quello di placca. Queste valvole permettono però di adoperare tensioni di placca assai ridotte (8 — 20 V). Hanno applicazione per circuiti speciali come rivelatrici e amplificatrici di bassa frequenza e come oscillatrice per eterodina.

4. - *Valvole schermate.* — Sono pure valvole bigriglie delle quali l'ausiliaria di rete molto fitta si trova tra la placca e la griglia normale ed è tenuta ad una tensione costante positiva uguale o minore di quella anodica mediante derivazioni fatte sulla pila anodica stessa.

Queste valvole hanno il vantaggio di offrire un coefficiente di amplificazione molto elevato (da 50 a 150) e si costruiscono in due modelli per alta e bassa frequenza. Alla griglia normale occorre dare quasi sempre una tensione negativa.

229. Dispositivi riceventi speciali. — Fra i molti dispositivi di circuiti radiotelefonici inventati collo scopo di una maggior amplificazione, una maggior selettività o sintonia, uno sfruttamento massimo delle proprietà dei triodi citiamo in succinto i più conosciuti:

1. - *Circuiti a doppia amplificazione.* In essi lo stesso triodo viene impiegato per amplificazione ad alta ed a bassa frequenza. La rivelazione è fatta con detector a cristallo separatamente.

2. - *Circuiti a supereterodina.* In questi dispositivi che servono specialmente per onde corte il triodo rivelatore ha la griglia accoppiata con capacità al circuito di antenna e nello stesso tempo (a mezzo di un trasformatore o altro sistema induttivo) con una valvola oscillatrice locale od eterodina. La griglia del triodo rivelatore subisce la tensione di battimento differenza fra la radiofrequenza e quella locale. Tale differenza viene regolata in modo di avere una frequenza media superiore alle massime frequenze udibili e cioè oltre 20 mila periodi. La frequenza di battimento riesce modulata e nel circuito di placca avremo la solita corrente continua pulsante che potrà rendersi immediatamente udibile a mezzo ricevitore telefonico, oppure che potrà essere amplificata con altre valvole in alta e bassa frequenza.

La *super autodina* è un dispositivo di circuiti che riduce a una sola valvola le tre funzioni di rivelatrice, oscillatrice e amplificatrice.

In alcuni casi di apparecchi riceventi ma sopratutto di trasmittenti si è pensato di alimentare il circuito di placca

della prima valvola A ricevente a mezzo di tensioni ricavate da un circuito oscillante locale a media frequenza (eterodina). In tal caso verranno rettificate le sole mezze onde positive dell'eterodina e la griglia della valvola A ricevendo gli impulsi d'antenna trasmetterà alle mezze onde di placca la modulazione.

Le dette mezze onde possono poi essere amplificate in alta e bassa frequenza. Il sistema si dice *ultradina.*

3. *Circuiti neutralizzati* o *neutrodine.* — Le valvole hanno fra griglia e placca una certa capacità (che i costruttori si sforzano di ridurre). Ciò fa sì che le oscillazioni di placca influiscono sul circuito di griglia con tendenza a crearsi nei collegamenti fra griglia e placca delle auto-oscillazioni le quali interferendo con quelle trasmesse alla griglia dall'antenna danno luogo a battimenti a frequenza musicale che si rivelano nei telefoni riceventi con fischi. Di solito si cerca di combattere queste oscillazioni variando le capacità inserite o il potenziale base di griglia o l'accensione del filamento in modo da distruggere la risonanza del circuito chiuso griglia placca. Ma ciò è a scapito della amplificazione. Molti dispositivi di neutralizzazione sono stati immaginati allo scopo; essi sono caratterizzati dalla presenza di un circuiti tale da svolgere fra griglia e placca variazioni di f. e. m. contrarie a quelle indotte dalla capacità placca - griglia.

230. Raddrizzatori a cristallo. — I raddrizzatori a cristallo — detector — sono formati da una punta d'acciaio o meglio di platino che si appoggia con leggera pressione sopra un pezzetto di galena cristallizzata (solfuro di piombo). Questi contatti a punta lasciano passare debolissime correnti (frazioni di mm Amp.) solo in un senso trasformando le correnti alta frequenza d'antenna modulate, in correnti continue pulsanti e direttamente udibili a mezzo di una cuffia. Non richiedono nessuna pila. Una scheggia di carborundum tra due lastrine di acciaio può servire come la galena ma richiede che una delle armature sia polarizzata. Le correnti rettificate sono nitidissime e prive di ogni distorsione.

Nella fig. 405 sono indicati, fra le molte combinazioni, tre schemi per cristallo a galena mentre il quarto schema

si adatta per scheggia di carborundum e nel circuito è compresa una pila shuntata da forte resistenza con una presa mobile (*potenziometro*).

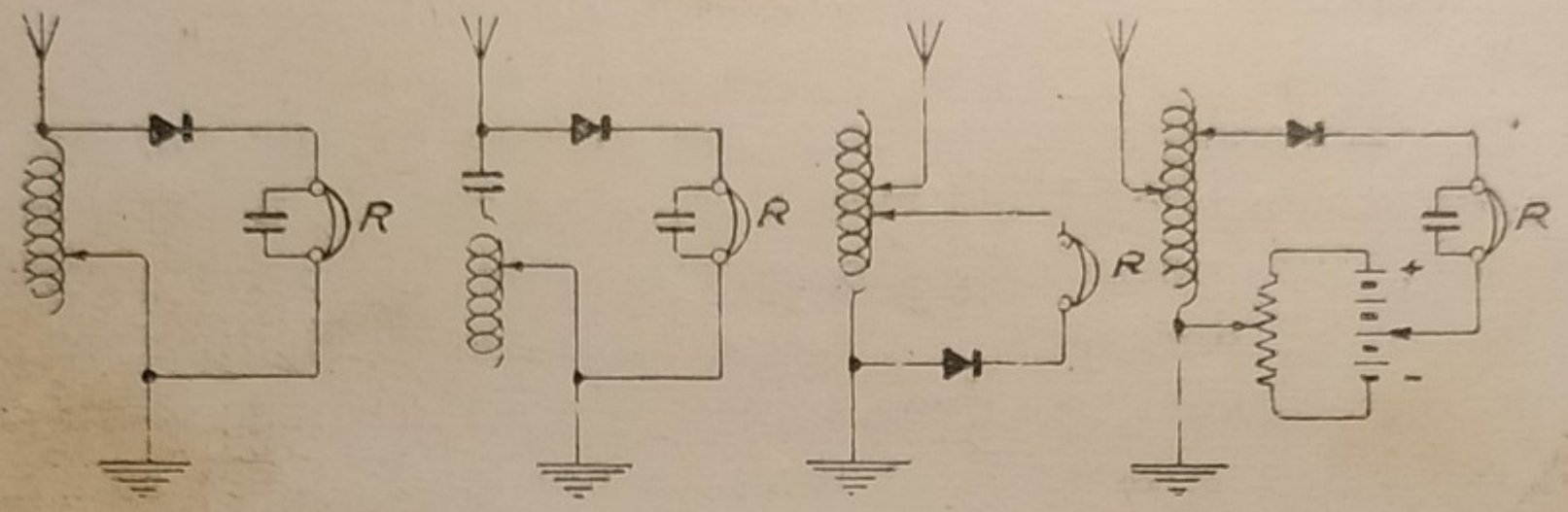


Fig. 405 - Schemi di ricevitori a cristallo.

In tutti gli schemi si nota la presenza di una piccola bobina di autoinduzione con prese variabili che serve per dare maggior selettività al circuito oscillante formato dalla capacità d'antenna e dalla bobinetta. Il circuito va connesso in punto opportuno colla terra.

In derivazione sulla presa di cuffia si mette quasi sempre un piccolo condensatore per dare passaggio a correnti alta frequenza, nel mentre esercita una assoluta ostruzione alla corrente continua. la quale viene a passare nel telefono.

231. Osservazioni generiche sulla costruzione degli apparecchi riceventi.

1. - Abbiam detto che nel circuito di placca (anodico) delle valvole amplificatrici e rivelatrici a. f. si forma una corrente continua variabile di intensità con pulsazioni ad alta frequenza le quali differiscono nella forma delle creste superiori e inferiori a seconda che la griglia opera la sua azione sul tratto rettilineo o sul tratto curvo della caratteristica (fig. 396).

Ove nel circuito di placca della prima valvola amplificatrice venisse inserito un trasformatore a nucleo di ferro, data la grande reattanza, si verrebbe a costituire una ostruzione quasi assoluta alle correnti oscillanti a. f., il che sarebbe nocivo. Si usa pertanto di mettere sul primario del detto trasformatore in *shunt* (in derivazione) un piccolo condensatore per scaricare le oscillazioni di a. e., lasciando al

trasformatore il passaggio delle sole correnti b. f. provenienti dalla rettificazione (vedi fig. 402).

Se la corrente anodica alimenta direttamente un ricevitore telefonico si mette il condensatore in derivazione sulla pila anodica.

2. - L'accoppiamento con una griglia di una valvola sia amplificatrice che rivelatrice a. f. a mezzo di un condensatore (fig. 398) porta alla conseguenza che la griglia assorbendo parte del flusso degli elettroni emanati dal filamento ed essendo isolata dal condensatore tende ad assumere una carica negativa, respingendo il flusso e perdendo della sua azione. Da ciò la necessità, nel caso in cui si faccia l'accoppiamento con condensatore alla griglia di shuntare il condensatore stesso con una alta resistenza (1-2 microhm).

3. - Nella costruzione degli apparecchi riceventi si devono scegliere con cura le valvole con caratteristiche adatte allo scopo (amplificazione a. f. - rettificazione - amplificazione a b. f.) e di dare una esatta tensione anodica e di griglia. Così è importantissimo per non aver distorsioni di suoni che le oscillazioni di placca siano esattamente proporzionali alle oscillazioni di griglia e perciò di far lavorare le valvole amplificatrici sul tratto rettilineo della caratteristica della fig. 396, dando, se di bisogno, una polarizzazione negativa alla griglia rispetto al filamento per mezzo di pila speciale o per mezzo di attacco al polo positivo della pila di accensione.

232. Antenne. — Le antenne irradianti delle stazioni trasmittenti sono alte da 25 a 100 m. e le dimensioni sono calcolate in relazione alla lunghezza d'onda e all'energia da trasmettere. Esse sono tanto più grandi e alte quanto più le onde sono lunghe. Hanno forma a T, a L, a ombrello, a V, ecc. ed i fili o corde sono fortemente isolate rispetto alla terra.

Le antenne degli apparecchi riceventi possono essere assai più semplici e si riducono a fili verticali di 8-10 m., a fili orizzontali semplici o doppi lunghi da 10 a 30 m. L'eccessiva lunghezza è a scapito della chiarezza dei suoni.

Un'antenna ricevente aerea avendo una capacità e induttanza propria ha anche un periodo proprio di oscillazio-

ne e di risonanza; per ricevere le onde di frequenza svariata occorre di correggere le caratteristiche (capacità e induttanza) d'antenna accoppiando questa con un *circuito oscillante d'accordo*. Regolando la capacità di quest'ultimo si varia la frequenza di risonanza mettendola in accordo colle onde che interessano di essere captate. La fig. 406 rappresenta alcuni schemi di circuiti d'antenna; i più comuni ed usati hanno l'antenna connessa direttamente o indirettamente (trasformatore, variometro) con una induttanza di 10 a 50 spire shuntata da un condensatore variabile di 0.0003 - 0.0005 microfarad.

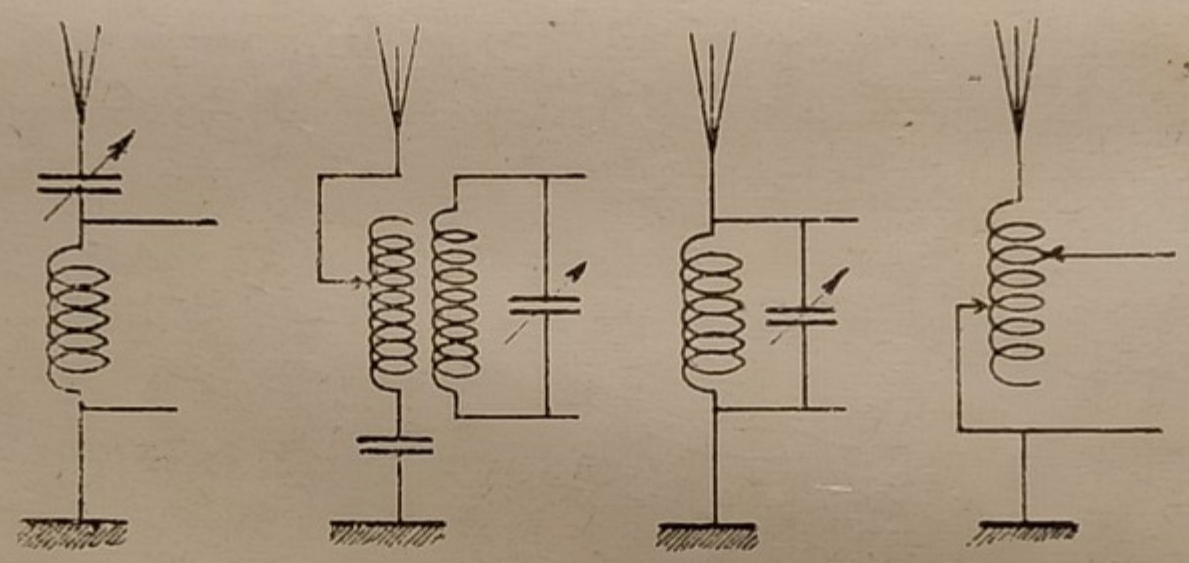


Fig. 406 - Collegamento d'antenna.

Negli schemi in cui non appare la capacità d'accordo e si approfitta di quella propria dell'antenna la regolazione dell'*accordo* si fa variando le spire dell'induttanza.

I circuiti d'accordo per alte frequenze si devono considerare come se fossero resistenze variabili le quali sono molto alte quando non sono in risonanza e diventano quasi zero quando sono in accordo e cioè risuonanti colle oscillazioni di tensione d'arrivo.

Invece di antenna si può ricevere con una spirale in aria di 10 a 30 spire di filo montate su telaio rettangolare, tondo ecc., che si dice *quadro*. Il quadro ha molto meno efficacia dell'antenna aerea ed ha bisogno di essere accoppiata con più circuiti oscillanti e possibilmente in reazione con più stadi di amplificazione a. f.

233. Stazioni trasmittenti e riceventi. — a) *Impianti radiotelegrafici.* — Questi impianti variano molto di mole, di

importanza, di costo, a seconda che si tratta di servizi terrestri, commerciali, intercontinentali oppure di corrispondenza a distanza limitata e cioè interna al paese, per navigazione, servizio costiero fino a distanza di qualche centinaio di chilometri. In Italia il servizio radiotelegrafico per uso commerciale è stato assegnato alla Società Italo Radio la quale ha impiantato diverse stazioni emittenti per servizio a distanze limitate e una stazione potente a Roma a onde lunghe e altra a onde corte per servizio con l'America, la Somalia, la China ecc. (23 e 15 m.).

La potenza in chilowatt consumata dalle stazioni radio telegrafiche trasmittenti varia sopratutto coll'importanza e distanza della trasmissione e colla lunghezza d'onda.

Con lunghezza d'onda di oltre un chilometro le grandi stazioni radiotelegrafiche richiedevano potenze di centinaia di chilowatt per le corrispondenze intercontinentali. Colle onde corte il consumo di energia è stato ridotto a qualche decina di chilowatt; gli apparecchi di bordo, di servizio costiero per limitate distanze consumano qualche chilowatt fino a qualche decina di watt.

Nei moderni impianti con onde corte tra 15 e 30 m. di lunghezza per ottenere la costanza della frequenza si ricorre ai cosidetti *risuonatori piezoelettrici* a lamina di quarzo. Essi sono basati sul seguente fenomeno scoperto da Curie nel 1880: quando certi cristalli minerali naturali vengono compressi secondo determinate faccie si polarizzano elettricamente cioè rivelano una differenza di potenziale. Viceversa gli stessi cristalli sottoposti ad una d. d. p. subiscono contrazioni o dilatazioni nelle dimensioni. Così quando ad una lamina di quarzo tagliata secondo determinati piani cristallini da un cristallo esaedro, si applicano due armature sottoposte ad una d. d. p. alternativa la lamina subisce delle contrazioni e dilatazioni ritmiche che raggiungono la massima ampiezza a determinate frequenze. La frequenza è data molto approssimamente dalla formola:

$$f = \frac{287000}{d}$$

dove d è lo spessore in cm.

Con queste laminette delle dimensioni di 2 a 4 cm. e spessore di qualche millimetro o decimi di mm. si possono combinare in unione a dei triodi degli oscillatori che hanno frequenze quasi assolutamente costanti.

Lo schema di un oscillatore è rappresentato dalla fig. 407.

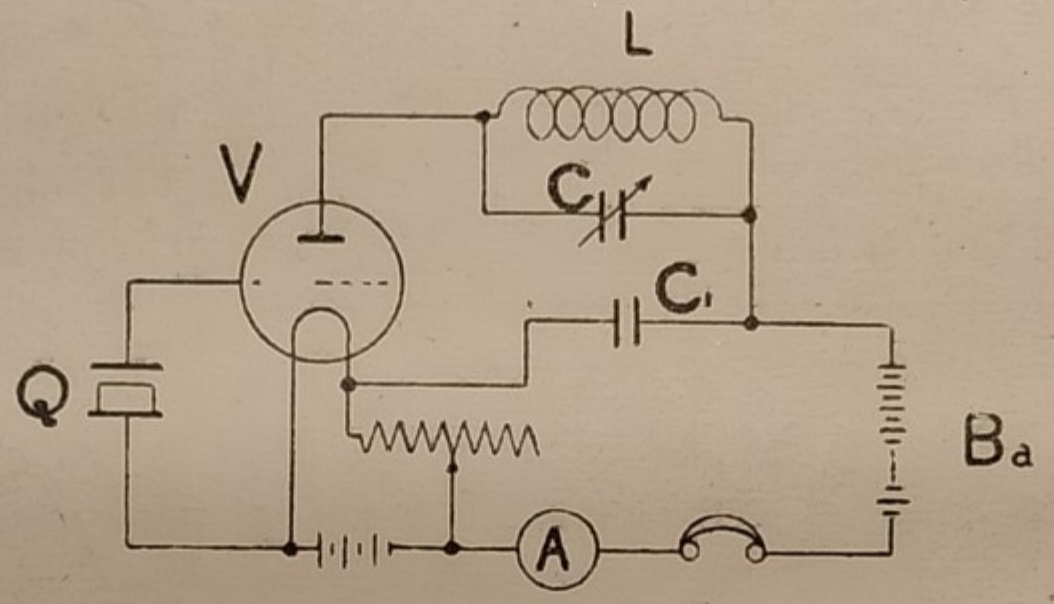


Fig. 407 . Circuito oscillante a frequenza fissa o in sottomultiplo.

Il circuito oscillante a frequenza costante è dato dal quarzo e dalla capacità interna del triodo V.; esso è accoppiato col circuito oscillante L C di placca nel quale, modificando la capacità di C, si possono generare oscillazioni esattamente sottomultiple della frequenza del quarzo. Con altri schemi si possono invece ottenere frequenze multiple e così arrivare, in più stadi di moltiplicazione, ad ottenere le altissime frequenze corrispondenti alle onde corte e con correnti di grande potenza atte ad essere irradiate dalle antenne.

Una stazione trasmittente radiotelegrafica richiede un generatore di energia (dato da alternatori o da trasformatori alimentati dalla rete di distribuzione stradale); un oscillatore di alta frequenza accordato mediante i soliti circuiti oscillanti; degli amplificatori di corrente e di tensione formati da triodi; un manipolatore dei segnali Morse che interrompa o varia la frequenza. Nei vecchi impianti l'oscillatore era dato da scintillatori o da archi Poulsen; nei moderni impianti da valvole. Nei piccoli impianti la sorgente d'energia è data da accumulatori e le oscillazioni e le alte tensioni da rocchetti di Rhumkorf o analoghi.

b) *Impianti radiotelefonici trasmittenti.* — In Italia la trasmissione radiotelefonica per uso pubblico (radio audi-

zioni) è concessa all'*Ente Italiano Audizioni Radiotelefoniche* (E. I. A. R.) che ha impiantato stazioni a Roma, Napoli, Milano, Torino, Genova e Trieste. Questi impianti adoperano onde di media lunghezza: fra 600 o 200 m. e la potenza irradiata varia da 1,5 KW a 52 (Daventry). Però è concesso in base a determinate regole di legge di fare trasmissioni con apparecchi di pochi watt per comunicazioni nel raggio di qualche chilometro.

Le parti principali di un impianto radiotelefonico sono: 1.° Una sorgente d'energia (può variare da un piccolo accumulatore ad alternatori di molte decine di chilowatt); 2.° Un sistema oscillatore ad onde persistenti di frequenza fissa formato da triodi di potenza accoppiati a capacità e induttanze; 3.° Una sala o studio in cui si producono le comunicazioni e concerti; 4.° Un microfono raccoglitore dei suoni; 5.° Le correnti telefoniche vengono trasmesse alla stazione emittente amplificate e sovrapposte alle correnti degli oscillatori. Le correnti modulate e amplificate sono immesse sull'antenna. La massima cura in questi impianti è diretta sopratutto ad ottenere frequenza costante, purezza nelle modulazioni che riproducono i suoni evitando ogni rumore (intrusi) e storpiamento.

I moderni apparecchi riceventi si possono dividere in due categorie:

1.° *Ricevitori senza cambiamento di frequenza* sono i più comuni per impianti con antenna e altoparlante, oppure con quadro ma audizione con cuffia. In essi trovano vasto impiego le nuove valvole schermate ed i pentodi ossia a 3 griglie.

Questi ricevitori si compongono di un circuito d'accordo d'antenna accoppiato con una o più valvole amplificatrici a. f.; una valvola rettificatrice; una o due valvole amplificatrici di bassa frequenza.

2.° *Ricevitori con cambiamento di frequenza* sono più complessi dei primi e sono adatti per recezione delle stazioni emittenti più lontane con quadro e altoparlante. Essi formano la classe delle supereterodine ed analoghe. Si compongono di un amplificatore a. f.; di un oscillatore e rive-

latore; di un amplificatore di media frequenza; di un secondo rivelatore; di un amplificatore a b. f.

Per stazioni emittenti locali con cuffia servono i ricevitori a cristallo di minimo costo e di una purezza di suoni assai migliore di quella degli altoparlanti.

L'alimentazione dei filamenti delle valvole si fa di solito con accumulatori di 2 - 3 - 4 volt e le pile anodiche si compongono con piccole pile a secco od accumulatori. Assai più comodi sono gli alimentatori di placca che trasformano la corrente alternata in corrente continua a diverse tensioni. La trasformazione si ottiene con diodi, trasformatori e apparecchi egualizzatori delle correnti pulsanti.

234. Ondametri. — Per misurare la frequenza delle onde si adopera l'ondametro composto di un circuito oscillante chiuso in una cassetta e formato da un condensatore variabile e da una serie di induttanze ricambiabili. Gli ondametri vengono tarati; per cui si può conoscere per ogni bobina d'induttanza e posizione del condensatore la frequenza di risonanza corrispondente. Per eccitare il circuito oscillante si adopera una pila e un piccolo trembleur come quello dei campanelli elettrici detto cicala dal rumore che fa vibrando. Colla corrente ad impulsi creato dal trembleur si eccita il circuito oscillante nel quale si formeranno treni di onde di conosciuta frequenza ma smorzate. Queste oscillazioni vengono comunicate all'aereo o quadro di apparecchio radiofonico ricevente avvicinando l'ondametro. Quando il ricevitore telefonico dell'apparecchio ripeterà il suono della cicala colla massima intensità allora è segno che il circuito dell'apparecchio e quello dell'ondametro sono sintonizzati. Così dalle tabelle annesse all'ondametro si potrà conoscere la frequenza.

Si può fare l'inverso e cioè: eccitare l'ondametro a mezzo di un circuito a. f. derivato dall'antenna o dall'apparecchio radiofonico e inserire una cuffia telefonica sopra un circuito accoppiato coll'ondametro unitamente a un raddrizzatore a cristallo. La risonanza si avverte quando il suono è massimo.

235. Telefonia a onde convogliate. — Fin quì abbiamo considerato come mezzo di trasmissione telefonica o telegrafica le onde eteree irradiate e ricevute da semplici antenne. Il sistema evidentemente non offre possibilità di segretezza poichè tutti possono intercettare con adatti apparecchi i segnali e suoni diffusi da tutte le stazioni emittenti.

Il sistema a onde guidate consiste nell'emettere ad una estremità di un filo delle onde alta frequenza modulate e di raccoglierle all'altra estremità; in tal modo è assicurata la segretezza. L'applicazione di questo sistema trova sopratutto la sua convenienza nell'usare come filo telefonico i fili telegrafici o di trasmissione d'energia anche ad altissima tensione senza recare nè avere nessun disturbo. Così è possibile di telefonare tra le centrali generatrici di energia e le sottostazioni senza dover costruire una linea telefonica speciale ma servendosi di uno dei fili di trasmissione dell'energia ad alta tensione.

Per immettere o ricevere le correnti a radio frequenza (circa 300000 cicli = onde di 1000 m.) sui fili d'energia si intromettono fra questi e gli apparecchi telefonici dei forti condensatori atti a sostenere largamente la tensione della corrente d'energia; oppure si usa anche di creare delle antenne mediante un centinaio di metri di linea telefonica parallela ai fili d'energia.

Nei posti di sezionamento delle linee d'energia si intromettono fra i capi dei fili interrotti che servono anche per la trasmissione telefonica dei condensatori i quali assicurano la continuità al passaggio delle correnti alta frequenza.

Le chiamate telefoniche si operano mediante elettromagneti ordinari che emettono treni d'onda a determinate frequenze; questi treni d'onda vengono raccolte dagli apparecchi riceventi accordati i quali richiudono il circuito locale di una pila con campanello.

Gli apparecchi costruiti in Italia dal Perego e diffusi in molti impianti idroelettrici e di trasmissione d'energia sono emittenti e riceventi e cioè la comunicazione telefonica avviene come in un qualsiasi telefono (duplex). Essi contengono anzitutto un circuito oscillante d'accordo e di sintonia collegato da una parte col condensatore separatore del filo

alta tensione e dall'altra parte con una valvola o triodo che fornisce energia al circuito oscillante e nel medesimo tempo rettifica sul circuito di placca le onde modulate, le quali vengono raccolte dal telefono. Il circuito oscillante accordato sull'alta frequenza è affatto insensibile alla frequenza indotta dalla trasmissione d'energia che come è noto è di 42 - 50 periodi.

Una derivazione fatta sul circuito oscillante contiene un dispositivo per modulare sulle correnti alta frequenza del circuito stesso, la corrente pulsante proveniente da un microfono e da una pila. Perciò lo stesso circuito oscillante d'accordo serve come ricevente e trasmittente.

Naturalmente la frequenza delle onde convogliate per la comunicazione telefonica deve tenersi un po' lontana da quelle delle stazioni che servono per le radioaudizioni pubbliche le quali potrebbero disturbare la prima. Tutto ciò si può regolare a mezzo del condensatore di sintonia del circuito oscillante.

INDICE

PARTE PRIMA

CAPITOLO I.

ELETTROSTATICA

		Pag.
1.	L'elettricità ed ipotesi sulla sua costituzione	9
2.	Corpi conduttori e corpi coibenti o isolanti	11
3.	Fenomeni elettrostatici principali	12
4.	Legge di Coulomb. Unità di carica	21
5.	Campo elettrico	22
6.	Potenziale	24
7.	Condensatori	26
8.	Unità di misura elettrostatiche ed elettromagnetiche	29
9.	Potere induttivo o costante dielettrica	30
10.	Tipi di condensatori	30
11.	Capacità di alcuni condensatori	33
12.	Energia nei condensatori	36
13.	Macchine elettrostatiche a strofinio ed a influenza	36
14.	Scariche nei gaz rarefatti	39
15.	Jonizzazione dei gaz	40
16.	Rigidità elettrostatica dei coibenti	41
17.	Fenomeno corona	42
18.	Isolanti impiegati nella pratica e loro uso	44
19.	Origine delle scariche atmosferiche e principio di costruzione degli scaricatori di linee	51

CAPITOLO II.

ELETTRODINAMICA GENERALE

20.	Corrente elettrica	55
21.	Circuito elettrico	55
22.	Forza elettromotrice (f. e. m.) e tensione o differenza di potenziale	57
23.	Intensità e densità della corrente	58
24.	Quantità di elettricità o di corrente	58
25.	Resistenza elettrica e sue leggi	59
26.	Influenza della temperatura sulla resistenza dei conduttori	61
27.	Legge di Ohm	64
28.	Applicazione della Legge di Ohm al calcolo delle linee a due fili	66
29.	Aggruppamento delle resistenze	69
30.	Leggi di Kirchoff	74

Pag.

31. Potenza prodotta od assorbita da un apparecchio o circuito elettrico 75
32. Lavoro o quantità di energia 77
33. Rendimennto delle macchine ed apparecchi elettrici 78
34. Riscaldamento dei conduttori - Legge di Joule 82
34. bis. Densità di corrente ed effetto sul riscaldamento dei conduttori 84
35. Calcolazione degli apparecchi di riscaldamento 86
37. Effetti termoelettrici Seebeck e Peltier 92
38. Pile termoelettriche e pirometri 93
39. Elettrolisi 95
40. Reazioni secondarie nell'elettrolisi 97
41. Teoria dell'elettrolisi 98
42. Leggi dell'elettrolisi 99
43. Tensione minima necessaria per una decomposizione elettrolitica 102
44. Applicazioni dell'elettrolisi 104
45. Pile 104
46. Polarizzazione delle pile e depolarizzanti 105
47. Tipi principali di pile 106
48. Accoppiamento delle pile 111
49. Accumulatori 114

CAPITOLO III.

MAGNETISMO ED ELETTROMAGNETISMO

50. Magneti e fenomeni magnetici 125
51. Campo magnetico 127
52. Legge delle attrazioni e ripulsioni o di Coulomb - Unità di quantità di magnetismo o massa magnetica 129
53. Induzione magnetica e comportamento dei corpi magnetici e diamagnetici 130
54. Forza di attrazione o portante dei magneti 133
55. Campo magnetico di una corrente e di un solenoide 135
56. Elettromagneti 138
57. Campo magnetico di una spira e definizione della unità di corrente 140
58. Espressione del campo magnetico interno ad un solenoide 141
59. Curve e tabelle di magnetizzazione 144
60. Circuiti magnetici - Legge di Ohm magnetica o di Hopkinson 145
61. Calcolazione dei circuiti magnetici 147
62. Forza portante degli elettromagneti 151
63. Isteresi magnetica 153
64. Energia dei campi magnetici 155
65. Azioni elettrodinamiche fra correnti e fra correnti e campi magnetici 157
66. Espressione della forza agente sopra un filo posto in un campo magnetico 161

CAPITOLO IV.

INDUZIONE ELETTROMAGNETICA

	Pag.
67. Fenomeno generale e casi diversi	163
68. Leggi dell'induzione elettromagnetica	167
69. Correnti di Foucault	170
70. Autoinduzione	172
71. Coefficiente di autoinduzione	175
72. Energia intrinseca di una corrente	177
73. Mutua induzione	178

CAPITOLO V.

CORRENTI ALTERNATE

74. Corrente alternata	183
75. Rappresentazione grafica delle correnti alternate	184
76. Intensità e forza elettromotrice efficace od effettiva	187
77. Comportamento della corrente altern. colle resistenze ohmiche	188
78. Rappresentazione delle correnti alternate coi vettori	189
79. L'autoinduzione nei circuiti a corrente alternata	194
80. Espressione della forza elettromotrice di autoinduzione	197
81. Impendenza o resistenza apparente	198
82. Corrente reattiva o di magnetizzazione	200
83. Forza elettromotrice indotta in un avvolgimento a spirale di un flusso magnetico alternativo	204
84. Bobine di autoinduzione o di reattanza	206
85. Effetto della capacità nei circuiti a corrente alternata	210
86. Circuiti con resistenze, capacità e reattanze in serie	215
87. Circuiti con resistenza indutttiva e capacità in parallelo	215
88. Fenomeni di risonanza	219
89. Skineffect o effetto Thomson	222
90. Potenza di un circuito a corrente alternata	224
91. Effetto economico sfavorevole dei circuiti a basso fattore di potenza	229
92. Sistema bifase	230
93. Sistema trifase	232
94. Rappresentazione vettoriale dei sistemi trifasi	234
95. Potenza dei circuiti trifasi	236
96. Campo magnetico ruotante o Ferraris	240
97. Velocità di rotazione dei campi ruotanti; inversione della loro rotazione	242
98. Principi di calcolo delle linee trifasi	244

CAPITOLO VI.

UNITA' DI MISURA, ISTRUMENTI DI MISURA E MISURAZIONI ELETTRICHE

99. Generalità	249
100. Definizione delle unità fondamentali del sistema C. G. S.	251

Pag.

101. Definizione delle principali unità pratiche di misura 252
102. Classificazione degli strumenti elettrici di misura 253
103. Tipi principali di strumenti e loro caratteristiche 255
104. Particolari costruttivi comuni degli strumenti industriali 260
105. Impiego dei voltmetri ed amperometri 262
106. Galvanometri e galvanoscopi 265
107. Misura dell'intensità di corrente coi voltmetri 268
108. Verifica degli amperometri e dei voltmetri 268
109. Misura delle resistenze 269
110. Misure delle piccole resistenze - ponte doppio di Thomson 274
111. Potenziometri 276
112. Misura di potenza - Wattmetro 279
113. Misura della potenza dei circuiti trifasi 282
114. Trasformatori riduttori di corrente e di tensione 288
115. Misura della quantità di corrente (amperometri o coulombometri) 290
116. Misura della quantità di energia (wattmetri o joulmetri) 291
117. Inserzione dei contatori nei circuiti 297
118. Verifica dei contatori 299
119. Frequenziometri 301
120. Indicatori di massima corrente 302

CAPITOLO VII.

DINAMO

121. Classificazione delle macchine ad induzione 305
122. Legge generale delle macchine a induzione 308
123. Flusso, f. e. m., intensità negli indotti a corrente alternata 311
124. Parti di una dinamo industriale 312
125. Principio di funzionamento delle dinamo 315
126. Collettore o commutatore 317
127. Posizione delle spazzole sui collettori 321
128. Commutazione della corrente ed origine delle scintille 321
129. Reazione d'armatura 324
130. Dinamo con poli ausiliari ed avvolgimenti di compensazione 326
131. Forza elettromotrice delle dinamo 328
132. Indotti delle dinamo 332
133. Principio degli avvolgimenti a tamburo 334
134. Caratteristiche dell'avvolgimento ondulato 336
135. Caratteristiche dell'avvolgimento parallelo 337
136. Avvolgimenti a matasse e a sbarre 339
137. Formole per gli avvolgimenti 341
138. Esempi di avvolgimenti 346
139. Avvolgimento serie - parallelo e doppio-parallelo 348
140. Eccitazione delle dinamo e loro regolazione 349
141. Adescamento delle dinamo. Senso di rotazione e polarità 350
142. Curve caratteristiche delle dinamo 351
143. Impiego e comportamento dei diversi tipi di dinamo 354
144. Perdite di energia nelle dinamo. Rendimento 355
145. Accoppiamento delle linee in parallelo 359

CAPITOLO VIII.

ALTERNATORI

	Pag.
146. Parti principali di un alternatore	363
147. Relazione fra il numero dei giri degli alternatori, il numero dei poli, e la frequenza della corrente	366
148. Avvolgimenti delle macchine a corrente alternata	368
149. Avvolgimenti trifasi	372
150. Avvolgimenti chiusi	380
151. Forza elettromotrice degli alternatori	381
152. Reazione di indotto degli alternatori. Caduta di tensione da carico zero a carico massimo	383
153. Caratteristiche degli alternatori	386
154. Calcolo grafico della caduta di tensione secondo Rothert	388
155. Accoppiamenti degli alternatori	389
156. Marcia in parallelo di più alternatori	392
157. Prove di collaudo ed esperimenti sulle dinamo ed alternatori	393
158. Rilievo del rendimento delle macchine elettriche	398

CAPITOLO X.

TRASFORMATORI

159. Trasformatori per corrente alternata	403
160. Forza elettromotrice nei trasformatori	404
161. Funzionamento dei trasformatori	406
162. Effetto della dispersione di flusso	411
163. Caduta di tensione dei trasformatori da carico zero a carico massimo	413
164. Diaframma circolare di Kapp	416
165. Perdite di potenza nei trasformatori	417
166. Raffreddamento dei trasformatori	418
167. Costruzione dei trasformatori	420
168. Trasformatori trifasi	424
169. Accoppiamento dei trasformatori	426
170. Autotrasformatori	430
171. Trasformatori da trifase in bifase e viceversa. Sistema Scott	431
172. Prove dei trasformatori	433
173. Regolatori di tensione a induzione	435

CAPITOLO XI.

MOTORI ELETTRICI A CORRENTE CONTINUA E ALTERNATA

174. Motori a corrente continua	439
175. Comportamento dei diversi tipi di motori	441
176. Inversione del senso di rotazione - Azione frenante dei motori	444

Pag.

177. Avviamento dei motori - Tipi e costruzione degli avviatori 445
178. Regolazione della velocità dei motori 448
179. Motori a corrente alternata 451
180. Motori sincroni e loro funzionamento 451
181. Avviamento dei motori sincroni 454
182. Motori asincroni 454
183. Funzionamento dei motori asincroni 456
184. Diagramma di Heyland 461
185. Avviamento dei motori asincroni 465
186. Potenza dei motori 467
187. Regolazione della velocità e inversione di moto 468
188. Generatori asincroni - Motori sincronizzati 469
189. Motori monofasi asincroni a collettore 471
190. Motori asincroni compensati 472
191. Prove di rendimento dei motori sia a corrente continua che a corrente alternata 473

CAPITOLO XII.

TRASFORMATORI RUOTANTI RADDRIZZATORI E TRASFORMATORI DI FREQUENZA

192. Trasformazione della corrente alternata in corrente continua 481
193. Convertitori di frequenza 485

SECONDA PARTE

CAPITOLO XIII.

PRODUZIONE DELL'ENERGIA

194. Centrali idroelettriche 491
195. Quadri di manovra e di distribuzione 501
196. Centrali termoelettriche 505

CAPITOLO XIV

CONDUTTURE ELETTRICHE PER TRASMISSIONE E DISTRIBUZIONE DELL'ENERGIA

197. Classificazione 509
198. Calcolo della sezione dei conduttori 511
199. Regolazione della tensione delle lunghe linee di trasmissione 516
200. Condutture aeree 517
201. Calcolazione delle catenarie 518
202. Pali 520
203. Reti di distribuzione a bassa tensione 524

Pag.
204. Distribuzione per le città 526
205. Isolatori per linee aeree 527
206. Norme di sicurezza per l'impianto delle linee aeree 530
207. Cavi sotterranei 532
208. Prove dei cavi e prosa 535
209. Regole di sicurezza per la posa dei cavi 536

CAPITOLO XV.

ILLUMINAZIONE ELETTRICA. - IMPIANTI DI MOTORI TARIFFICAZIONE

210. Impianti di illuminazione elettrica 537
211. Unità fotometriche 538
212. Inserzione delle lampade - Installazione e isolamento dei fili 540
213. Norme di sicurezza della A. E. I. per gli impianti interni 542
214. Illuminazione pubblica stradale 545
215. Impianti di motori elettrici 546
216. Concetti di tariffazione della energia elettrica 548
217. Tariffe 549

TERZA PARTE

CAPITOLO XVI

NOZIONI DI RADIOTELEGRAFIA E RADIOTELEFONIA

218. Onde elettromagnetiche od Hertziane 553
219. Generazione delle oscillazioni 555
210. Circuiti oscillanti 558
221. Modulazione delle onde trasmittenti 561
222. Ricezione dei segnali e dei suoni 563
223. Valvole termoioniche - Diodi 565
224. Valvole a tre elettrodi o triodi 566
225. Il triodo come rivelatore 569
226. Il triodo come amplificatore 570
227. Il triodo come oscillatore - Reazione 572
228. Tipi diversi di valvole 574
229. Dispositivi riceventi speciali 575
230. Raddrizzatori a cristallo 576
231. Osservazioni generiche sulla costruzione degli apparecchi riceventi 577
232. Antenne 578
233. Stazioni trasmittenti e riceventi 579
234. Ondametri 583
235. Telefonia a onde convogliate 584

C.G.S.

ISTRUMENTI DI MISURA

SOCIETÀ ANONIMA

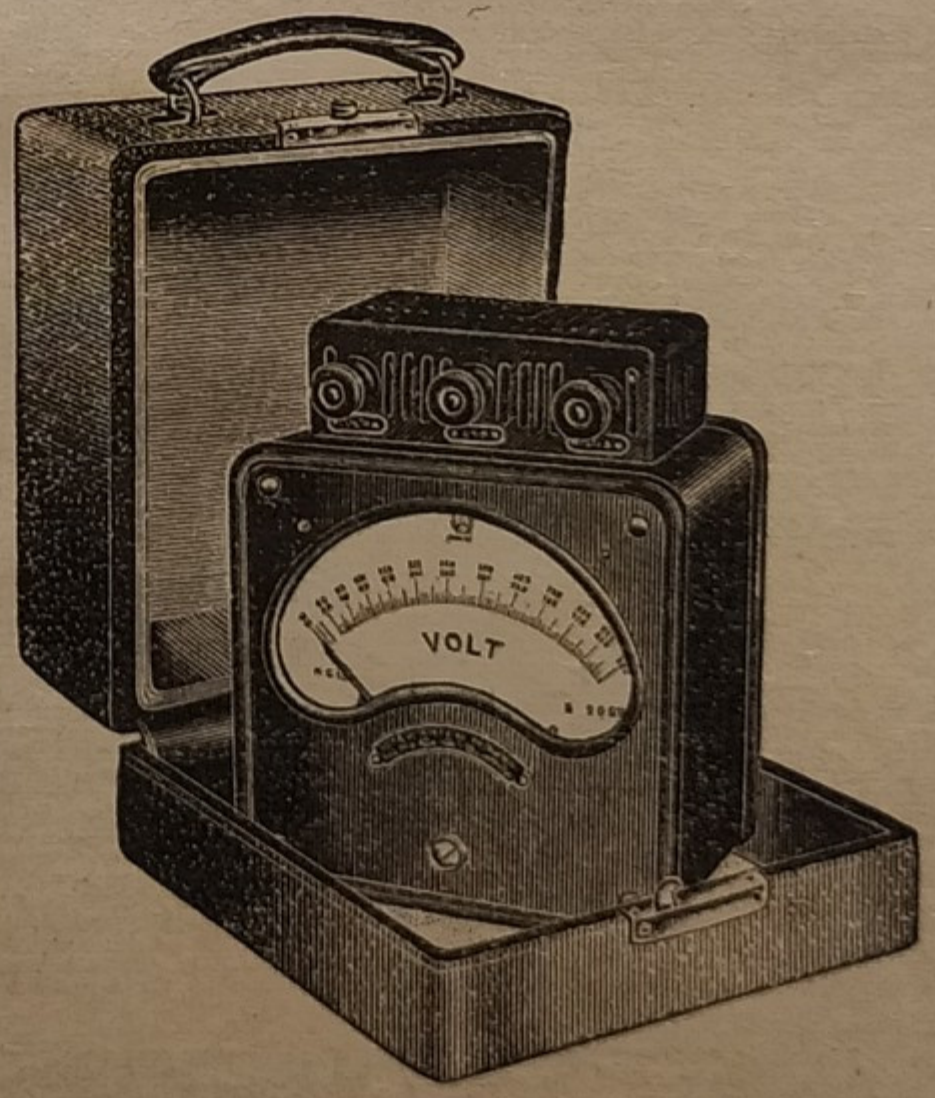
CONTATORI ELETTRICI :: WATTMETRI :: VOLTMETRI :: AMPEROMETRI :: INDICATORI E REGISTRATORI DA QUADRO E PORTATILI :: TRASFORMATORI DI MISURA

C G S

ITALIA

MILANO
Via M. NAPOLEONE 39

MONZA
Via CAVALLERI 2



Amperometri e Voltmetri elettromagnetici portatili, tipo HC 13 T

S.C.A.C.

SOCIETÀ CEMENTI ARMATI CENTRIFUGATI

ANONIMA PER AZIONI - Cap. L. 5.000.000 inter. versato

SEDE LEGALE: **MILANO**

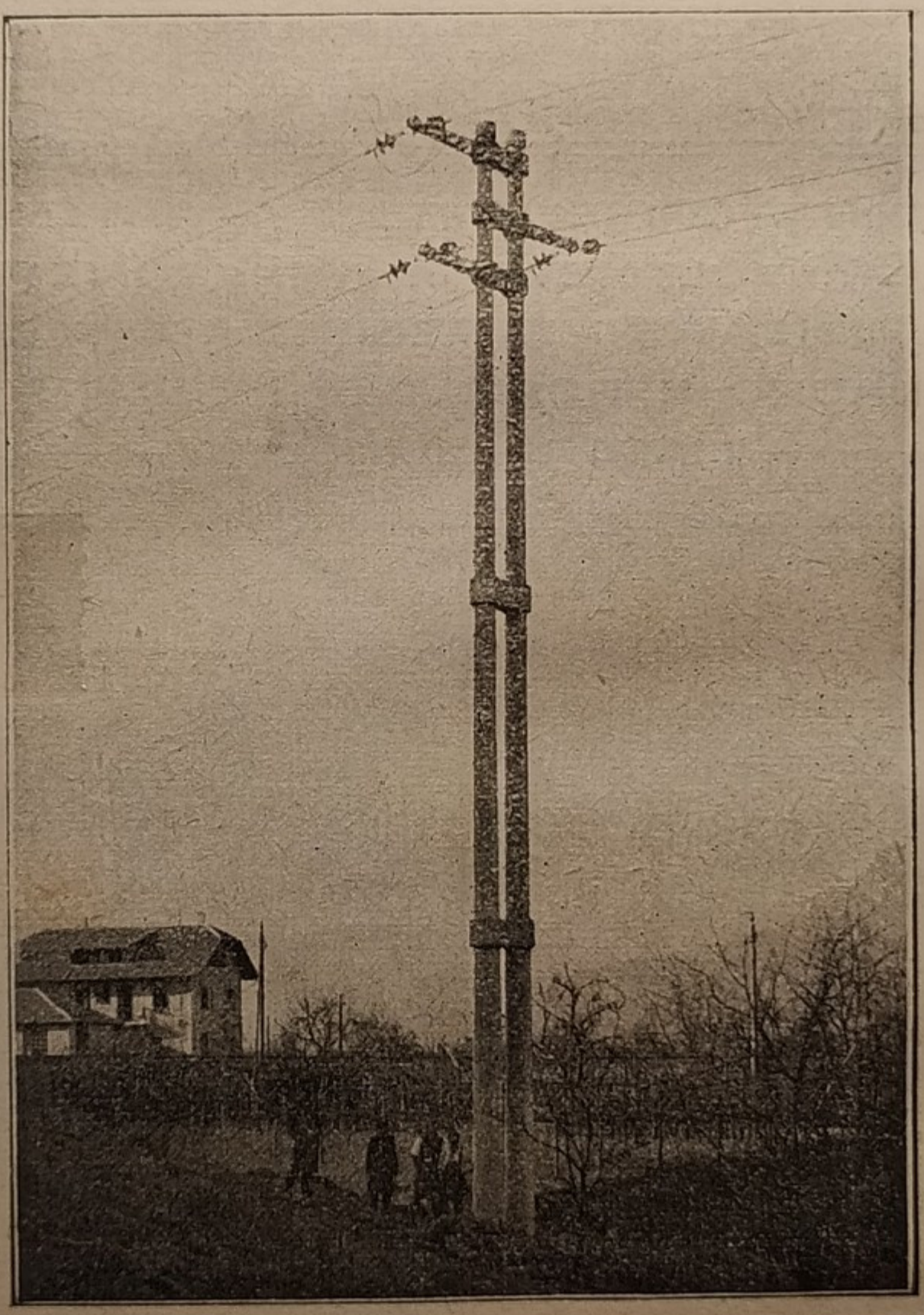
DIREZIONE E AMMINISTRAZIONE

Corso Regina Margherita N. 1 **TRENTO** **Casella Postale Numero 337**

Indirizzo Telegrafico **SCAC** - TRENTO - Telefono N. 618

Stabilimenti: **Mori Ferrovia** (Trentino)
Torre Annunziata Centrale (Napoli)

Uffici: **Milano** via Monte Napoleone 39, Tel. 71.139
Roma via Cicerone 28, Tel. 22.902
Napoli via Giuseppe Verdi 18, Tel. 20.579



Linea a 17.000 Volt (in seguito 60.000) Volt
Tel - Bolzano della Società Etschwerke di Merano

FORNITURE DI PALI CENTRIFUGATI per linee elettriche, trazione elettrica, illuminazione pubblica, telegrafi, telefoni, costruzioni subacque. — TUBI SCAC per acquedotti, drenaggi, fognature. — Costruzione completa di linee elettriche.

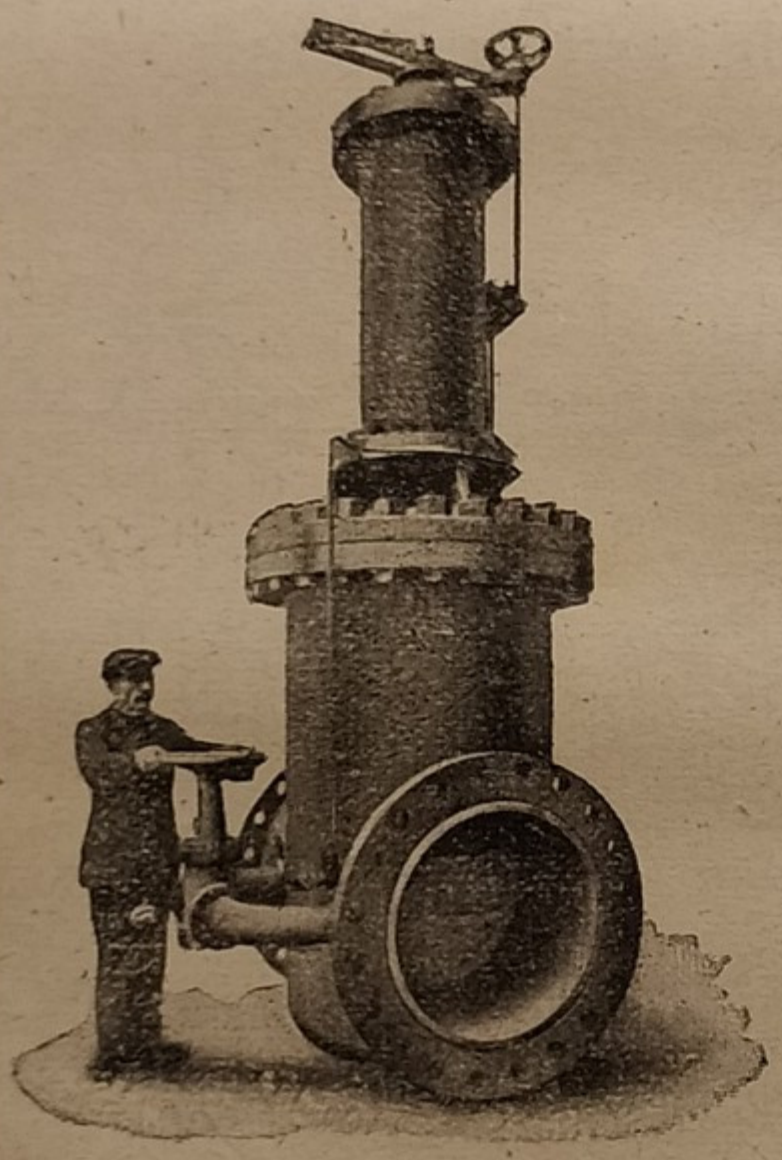
TUBI TOGNI = Brescia

La più grande Casa costruttrice di

Condotte Forzate in Lamiera di Acciaio

per impianti idroelettrici

600 impianti per oltre 3.000.000 HP.



Saracinesca a servomotore idraulico per alte pressioni

TUBI CHIODATI
per basse pressioni

TUBI SALDATI
per medie pressioni

TUBI BLINDATI
(Sistema Togni)
per alte pressioni

Accessori per Condotte Forzate: **Saracinesche, valvole, apparecchi di sicurezza, apparecchi automatici di chiusura e regolazione di portata**

⊙ **Paratoie, Griglie** ⊙

⊙ **Pali a traliccio** ⊙

∴ BOMBOLE ∴

Serbatoi, caldaie, apparecchi per l'industria chimica, per zuccherifici

SOCIETÀ ANONIMA BREVETTI

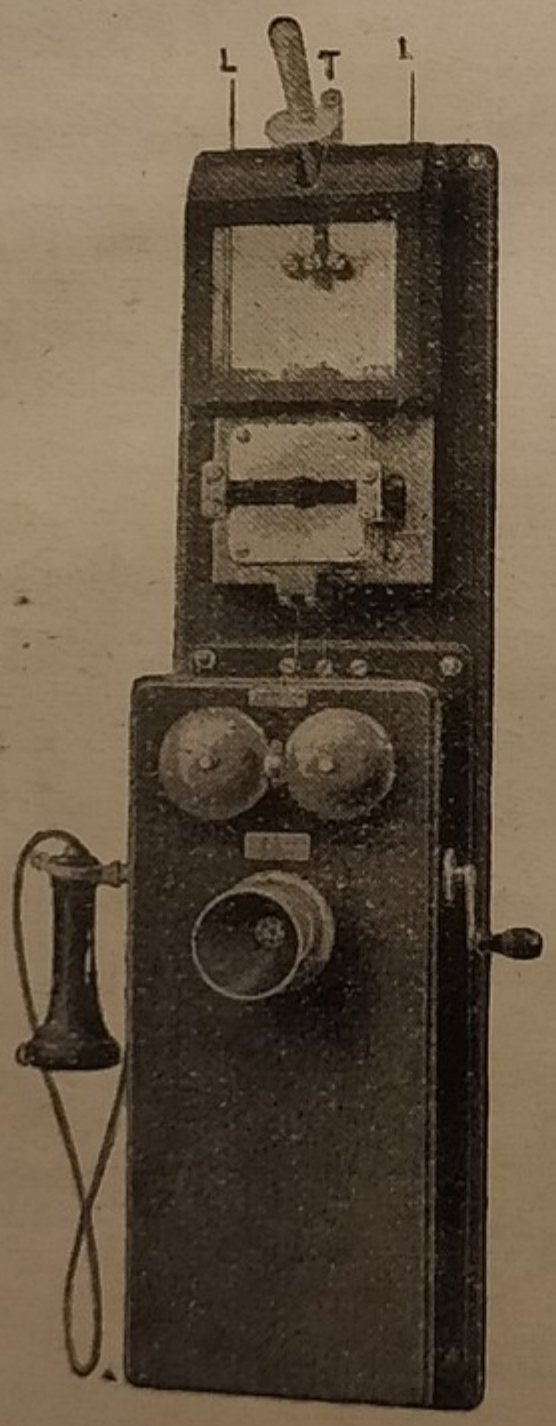
ARTURO PEREGO

MILANO — Via Salaino 10 — MILANO

Telefono 42455

Filiale - **Roma** - Via Tomacelli 15 - Telefono 60-102

Telefoni per tutte le applicazioni



Specialità: Telefoni di sicurezza antinduttivi per linee **A. T.**

Telefoni per telefonia simultanea su filo telegrafico;

Telefoni a chiamata selettiva;

Telefoni stagni inesplosivi per palo, luoghi umidi, miniere.

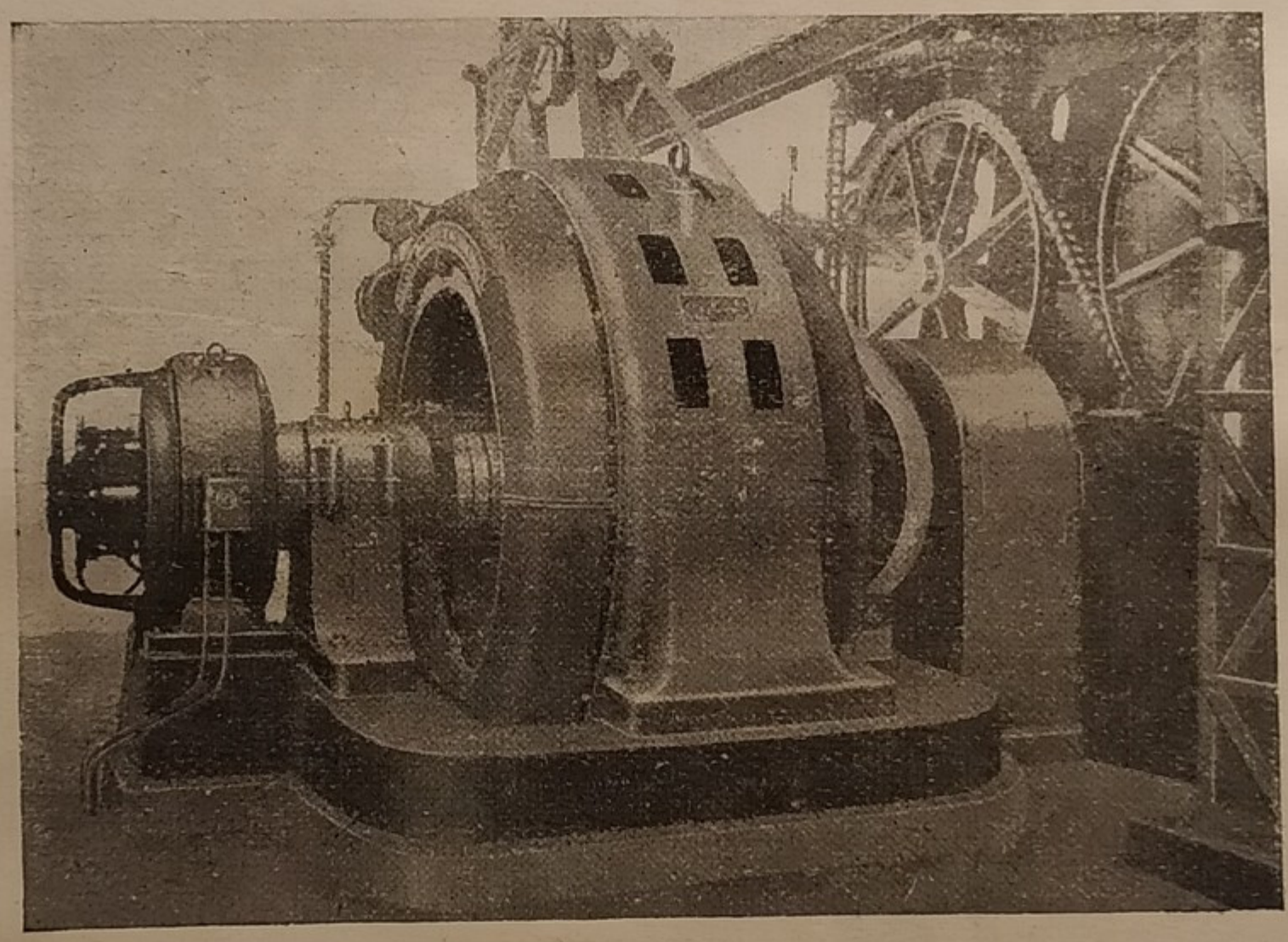
Stazioni Radiotelefoniche e Radiotelegrafiche Simplex e Duplex ad Onde Convogliate al servizio di impianti elettrici.

Telefoni e centralini comuni per qualunque distanza ed ogni accessorio telefonico.

MARELLI

MACCHINE ELETTRICHE

MOTORI AUTOSINCRONI
PER CORREZIONE FATTORE DI POTENZA



MOTORE AUTOSINCRONO, TIPO **MAST**
DIRETTAMENTE ACCOPPIATO A SFIBRATORE
420 HP - 500 VOLT - 42 PERIODI - 210 GIRI

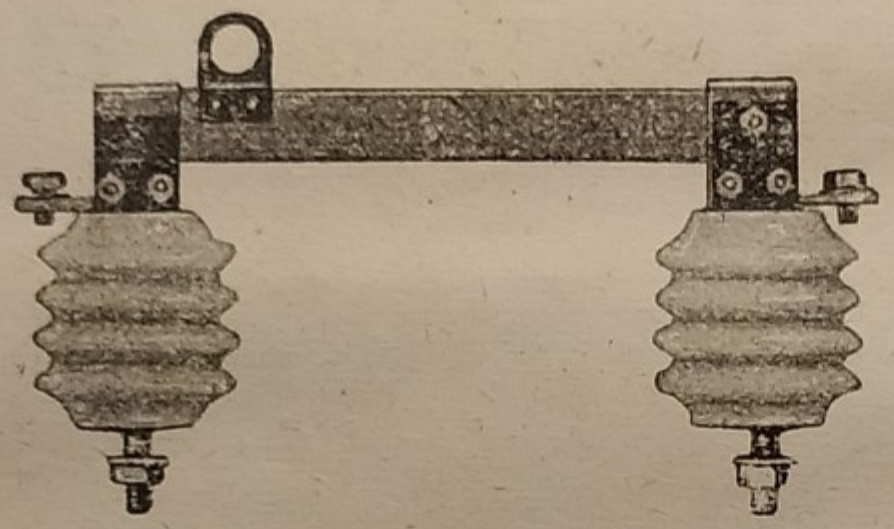
ERCOLE MARELLI & C. - S. A.

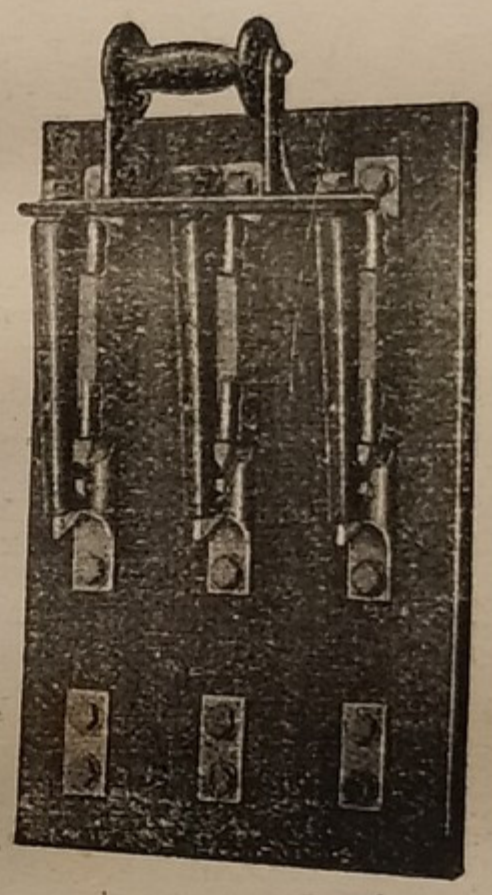
Corso Venezia N. 22 - MILANO - Casella Postale 1254

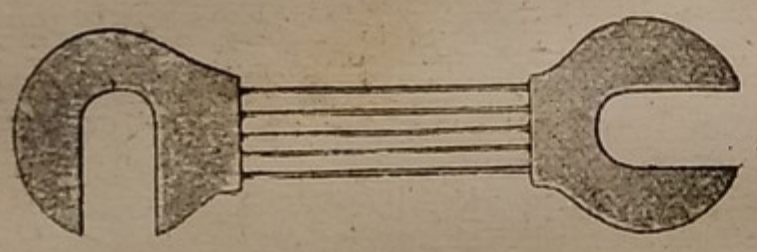
FEDERICO PALAZZOLI & C.

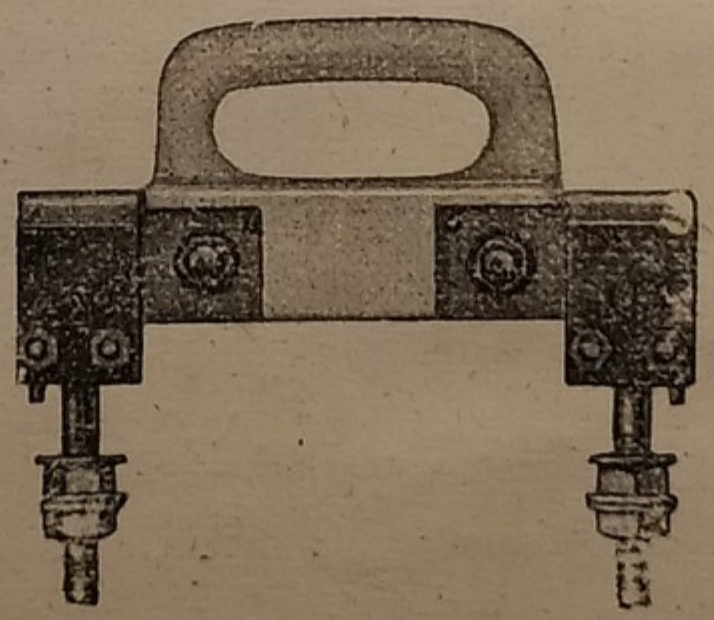
INDUSTRIA ELETTROTECNICA

Via Nicolò Tommaseo, 20 — Brescia — Sede propria



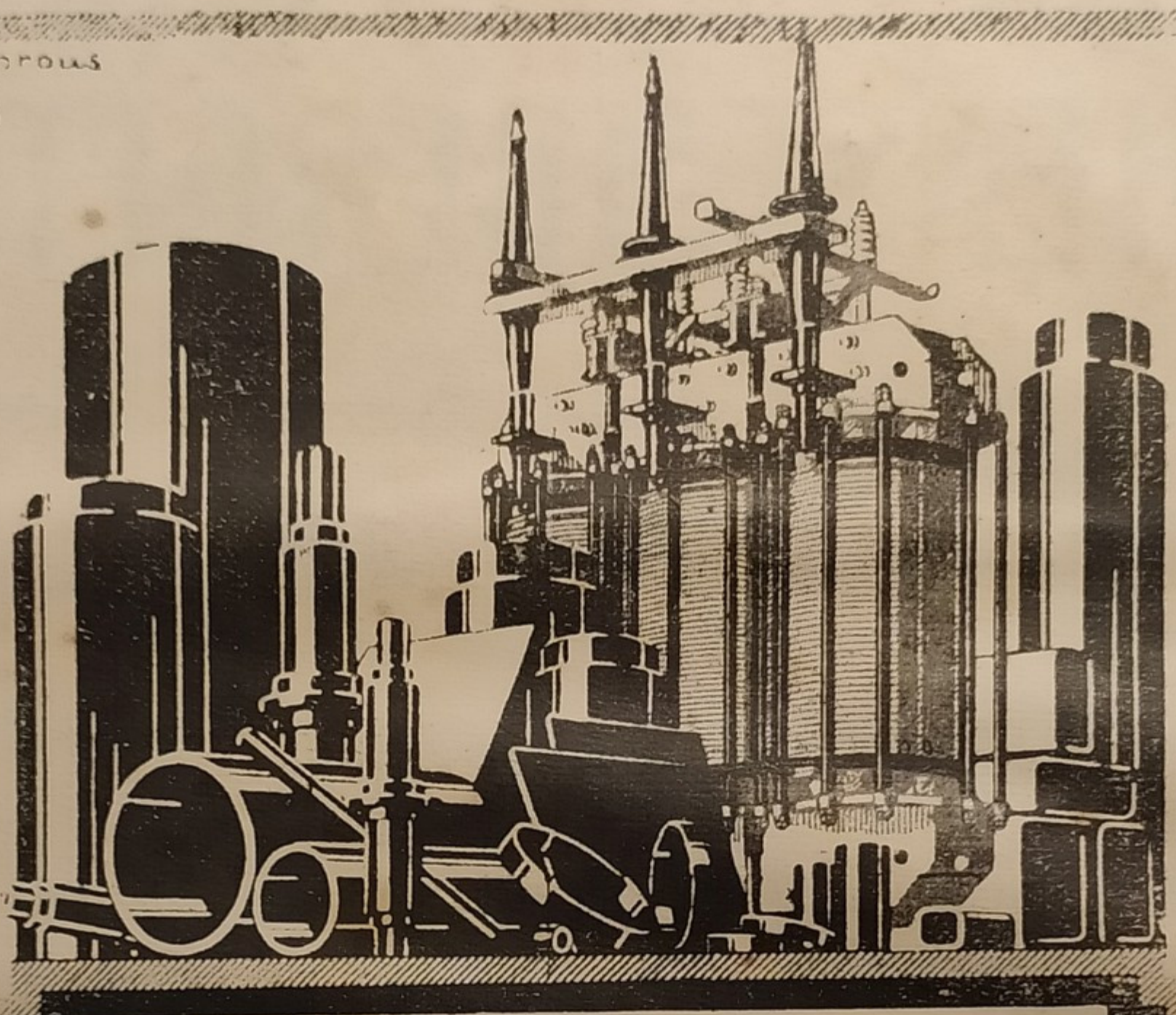






FABBRICA APPARECCHI PER BASSE ED ALTE TENSIONI E RELATIVI ACCESSORI

: CHIEDERE LISTINI ED OFFERTE :



MONTI & MARTINI - S. A.

FABBRICHE RIUNITE MATERIALE DIELETTRICO

Capitale L. 5.000.000 inter. versato

Via Comelico 41 - **MILANO** (133) - Via Comelico 41

Telefoni 50381 - 50382 - 51711

Fabbriche: **Milano - Arcore - Somma Lombardo - Bovisa**

MATERIALI ISOLANTI PER ELETTROTECNICA

SUPER-BA — SUPERBOL — TRIEMME

BIASBESTO — FIBROIDO — FORMOLO — IPERFORMOLO

ACCUMULATORI HENSEMBERGER

Accumulatori stazionari di qualsiasi capacità.

Accumulatori speciali in recipienti di ebanite per locomotori elettrici.

Accumulatori leggeri per elettromobili e battelli.

Accumulatori speciali per propulsione sommergibili.

Batterie portabili per illuminazione, avviamento motori a scoppio, telegrafia e telefonia, ecc.

Batterie speciali per illuminazioni vetture ferroviarie e tramviarie.

Locomotori elettrici ad accumulatori.

Veicoli elettrici ad accumulatori.

FABBRICA ACCUMULATORI HENSEMBERGER

MONZA

R

asi

di

bili

one

N-

le-

ire

E

R